Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

Evaluación de riesgos de contaminación relativos a los cuerpos de agua superficial en la subcuenca del río Agujas y la subcuenca de las quebradas de playa Colorada en Bahía Drake de Osa, Puntarenas

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

María Gabriela Castillo Campos

Directora del Proyecto de Graduación:

Ing. Paola Vidal Rivera

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica Septiembre, 2021

APROBACIÓN DEL DOCUMENTO

Lic. Paola Vidal Rivera
Directora de proyecto

Dr. Arnold Molina Porras
Asesor

José Daniel Quesada Rojas
Asesor

Gabriela Castillo Campos
Postulante

DERECHOS DE PROPIEDAD INTELECTUAL

Fecha: 2020, septiembre, 1

El suscrito, María Gabriela Castillo Campos, cédula 02-0745-0903, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B31539, manifiesta que es autora del Proyecto Final de Graduación Evaluación de riesgos de contaminación relativos a los cuerpos de agua superficial en la subcuenca del río Agujas y la subcuenca de las quebradas de playa Colorada en Bahía Drake de Osa, Puntarenas, bajo la Dirección de la licenciada, Paola Vidal Rivera, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación. Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

DEDICATORIA

A mis papás y mi familia por enseñarme a soñar, a trabajar para conseguir lo soñado, y por de su incansable apoyo.

Y a mi amado esposo por acompañarme en los días buenos y malos, y recordarme que siempre se puede ser mejor.

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de proyecto Paola Vidal por el apoyo en todo el proceso, el tiempo dedicado y la confianza. Así como a mis asesores Arnold y José Daniel, por sus consejos, su entusiasmo y disponibilidad. por el acompañamiento.

A los miembros del proyecto de investigación "Conservación de zonas de alta densidad de biodiversidad, por medio de la caracterización de contaminantes disueltos y sólidos suspendidos en el recurso hídrico e identificación de tecnologías en salud para las zonas costeras, Península de Osa" inscrito a la vicerrectoría de investigación de la Universidad de Costa Rica, por permitirme participar del proceso, además por el arduo trabajo en la obtención de información.

A la ASADA de Drake por su colaboración en el proyecto y su anuencia a atendernos para responder las dudas que fuesen necesarias.

A los estudiantes miembros del Trabajo Comunal Universitario titulado "Taller de Investigación en Salud Comunitaria para la Península de Osa" que participaron en las giras del 2019, por su gran esfuerzo en la recopilación de información y su entusiasmo por colaborar con las comunidades de Bahía Drake. En especial a Valentina, Manuel, Luis, Jana, Verónica, Edwin y Nelson.

Al personal del Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Costa Rica por permitirme utilizar las instalaciones y equipo adecuado para el proceso de muestras, y el equipo GPS para el levantamiento de datos.

A Mc Gregor por su apoyo en la revisión de los datos geográficos obtenidos y por su anuencia a colaborar siempre que fuese posible.

A mi querida universidad y todas las personas que de alguna manera me brindaron su ayuda a través de los vaivenes de la vida, mi agradecimiento sincero.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN....1
1.1 Justificación....1
1.2 Problema específico....3
1.2.1 Importancia....4
1.2.2 Antecedentes teóricos históricos de la zona de estudio....5
1.2.3 Legislación y reglamentos vigentes aplicables....6
1.2.4 Delimitación del problema....9
1.3 Objetivos....12
1.3.1 Objetivo general....13
1.3.2 Objetivos específicos....13
1.4 Descripción de la metodología....13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO....16
2.1 Evaluación de riesgos ambientales....17
2.1.1 Análisis del medio....17
2.1.2 Evaluación de los peligros identificados....23
2.1.3 Caracterización del riesgo....23
2.2 Cuenca como unidad de estudio....24
2.2.1 Parámetros morfométricos generales....24
2.2.2 Parámetros morfométricos asociados al relieve....25
2.2.3 Parámetros morfométricos asociados a la forma....28
2.2.4 Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje....31
2.3 Análisis multiespectral de imágenes satelitales....34
2.3.1 Satélite Landsat....35
2.3.2 Clasificación de imágenes satelitales....40
2.4 El agua de cuerpos superficiales....42

2.4.1 Ciclo hidrológico 42
2.4.2 Calidad del agua 46
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO DE EXPOSICIÓN 57
3.1 Caracterización morfométrica 57
3.1.1 Resultados de parámetros morfométricos generales 60
3.1.2 Resultados de parámetros morfométricos asociados al relieve 61
3.1.3 Resultados de parámetros morfométricos asociados a la forma 69
3.1.4 Resultados de parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje 70
3.2 Uso del suelo 73
3.2.1 Clasificación supervisada de imágenes satelitales 73
3.2.2 Áreas de injerencia geográfica 85
3.3 Información territorial 89
3.3.1 Aspectos climáticos 90
3.3.2 Tipo de suelo 94
3.3.3 Ordenamiento territorial 96
3.3.4 Aspectos socioeconómicos 102
3.4 Descripción de la visita de campo 113
3.4.1 Cuenca del río Agujas 113
3.4.2 Cuenca de las quebradas de playa Colorada 115
3.5 Resultados de muestreos de calidad del agua 123
3.5.1 Pruebas realizadas 123
3.5.2 Clasificación de los resultados 135
CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES 142
4.1 Análisis del escenario de exposición 142
4.1.1 Árbol de fallo 143
4.2 Estimación del riesgo ambiental 152

4.2.1 Sistema de evaluación de riesgo 152
4.2.2 Resultados de la evaluación de riesgo ambiental 163
4.3 Caracterización del riesgo ambiental 182
CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES DE LOS RIESGOS AMBIENTALES IDENTIFICADOS ... 192
5.1 Recomendaciones generales 192
5.2 Recomendaciones para la cuenca del río Agujas 194
5.3 Recomendaciones para la cuenca de las quebradas de playa Colorada 198
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 203
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 210
ANEXOS 1
Anexo A. Solubilidad del oxígeno en función de la temperatura y la salinidad 1
Anexo B. Efectos biológicos del bajo nivel de OD en peces 1
Anexo C. Resultados de pruebas de plaguicidas realizado en febrero 2020 por el CICA 1
APÉNDICE 1
Apéndice A. Imágenes de satelitales procesadas, resultados de clasificación supervisada, imágenes en falso color e infrarrojo 1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Delimitación de la zona de estudio 10
Figura 2. Diagrama de la metodología del proyecto 15
Figura 3. Interrelación de las dimensiones social, ambiental y económica en el escenario de exposición 19
Figura 4. Esquema metodológico de análisis por árbol de fallo 22
Figura 5. Metodología de análisis y evaluación de riesgos ambientales 23
Figura 6. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Ferre, 1999) 26
Figura 7. Relación entre la morfología de la cuenca y el caudal para eventos de precipitación 29

Figura 8. Número de orden de corrientes según Horton (Serrano, 2017) 32
Figura 9. Ejemplo de imagen Landsat sin SLC (izq.) y con SLC (der.) 38
Figura 10. Ejemplo de procedimiento *Pan-sharpening* 41
Figura 11. Ciclo hidrológico 42
Figura 12. Efectos de la urbanización en la respuesta de una cuenca hidrográfica a la precipitación 44
Figura 13. Modelo de elevación digital para la cuenca del río Agujas 57
Figura 14. Modelo de elevación digital para la cuenca de la quebrada El Mono 59
Figura 15. Modelo de elevación digital para la cuenca de la quebrada Don Carmen 60
Figura 16. Mapa de pendientes de la cuenca del río Agujas 62
Figura 17. Mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada El Mono 63
Figura 18. Mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada Don Carmen 64
Figura 19.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca del río Agujas 66
Figura 20.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca de El Mono 67
Figura 21.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca de Don Carmen 68
Figura 22. Comparación del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas 81
Figura 23. Comparación porcentual del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas 82
Figura 24. Comparación del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada 84
Figura 25. Comparación porcentual del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada 85
Figura 26. Reserva Forestal Golfo Dulce en el escenario de exposición 87
Figura 27. Corredor biológico en el escenario de exposición 89
Figura 28. Zonas de vida que influyen en el escenario de exposición 91
Figura 29. Ubicación de estaciones meteorológicas del IMN 92
Figura 30. Precipitación mensual en el escenario de exposición 94
Figura 31. Tipo de suelo para la zona de estudio 95

Figura 32. Ubicación de abonados de la ASADA de Drake 105
Figura 33. Producción de agua residual para los años 2018,2019 y 2020 en la ASADA de Drake 106
Figura 34. Ejes y variables considerados en la evaluación de índices de desarrollo social ... 107
Figura 35. Distribución geográfica de las principales actividades económicas en el Pacífico Sur 108
Figura 36. Visitantes a áreas protegidas del sistema SINAC..... 109
Figura 37. Ubicación de los puntos de muestreo definidos 123
Figura 38. Árbol de fallos para la contaminación por vertidos de aguas residuales domestica 145
Figura 39. Árbol de fallos para la contaminación por residuos sólidos en los cuerpos de agua superficiales 147
Figura 40. Árbol de fallos para la contaminación por procesos de deforestación..... 149
Figura 41. Árbol de fallos para la contaminación relativa a actividades agropecuaria 151
Figura 42. Matriz de estimación de riesgo ambiental 162

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal 8
Cuadro 4. Nivel de tratamiento sugerido para cada clase según clasificación de los cuerpos de agua superficiales 9
Cuadro 5. Identificación típica de las fuentes de peligro.....20
Cuadro 6. Formas de la cuenca de acuerdo con el índice de compacidad 30
Cuadro 7. Fecha de lanzamiento y retiro de los satélites Landsat.....36
Cuadro 8. Características espectrales de la imagen de Landsat 7 ETM+ 37
Cuadro 9. Características espectrales de la imagen de Landsat 8.....39
Cuadro 10. Parámetros morfométricos generales 61
Cuadro 11. Parámetros morfométricos asociados al relieve 64
Cuadro 12. Parámetros morfométricos asociados a la forma 69
Cuadro 13. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje.....71

Cuadro 14. Área de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas 80
Cuadro 15. Porcentaje de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas 80
Cuadro 16. Área de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada 83
Cuadro 17. Porcentaje de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada 83
Cuadro 18.Distribución del área en la Reserva Forestal de Golfo Dulce 86
Cuadro 19. Zonas de vida que influyen en el escenario de exposición 91
Cuadro 20. Parámetros meteorológicos anuales del IMN 93
Cuadro 21. Cantidad de población estimada para el distrito de Bahía Drake 102
Cuadro 22. Tipos de vivienda en el distrito de Bahía Drake 102
Cuadro 23. Clasificación por rango de edades y años de escolaridad 103
Cuadro 24. Resultados de IDS para el distrito de Bahía Drake y de Sierpe 107
Cuadro 38. Características de los puntos de muestreo del río Agujas 114
Cuadro 39. Características de la quebrada Don Carmen 115
Cuadro 40. Características de la quebrada El Mono 118
Cuadro 41. Condiciones de riesgo encontradas en la cuenca de las quebradas de playa Colorada 119
Cuadro 25. Ubicación de los puntos de muestreo definidos 124
Cuadro 26. Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos en campo 126
Cuadro 27. Resultados de nutrientes nitrato, nitrito, nitrógeno amoniacal y fósforo 126
Cuadro 28. Resultados de turbiedad y color el agua 129
Cuadro 29. Resultados de alcalinidad 130
Cuadro 30. Resultados de demanda bioquímica y química de oxígeno 131
Cuadro 31. Resultados de oxígeno en el agua (medido en campo) 131
Cuadro 32. Resultados de sólidos totales en el agua 133
Cuadro 33. Resultados de las pruebas microbiológicas 134
Cuadro 34. Evaluación de parámetros de la gira de julio 2019 según el Reglamento para la clasificación de cuerpos de agua superficiales 137

Cuadro 35. Evaluación de parámetros de la gira de febrero 2020 según el Reglamento para la clasificación de cuerpos de agua superficiales 138
Cuadro 36. Resultado de análisis de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores para muestras de julio 2019 140
Cuadro 37. Resultado de análisis de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores para muestras de febrero 2020 141
Cuadro 42. Escala de determinación de la probabilidad de ocurrencia 152
Cuadro 43. Escala para la determinación de la gravedad de las consecuencias 155
Cuadro 44. Descripción de los valores de escala para el parámetro de cantidad de contaminante 157
Cuadro 45. Descripción de los valores de escala para el parámetro de peligrosidad del contaminante 158
Cuadro 46. Descripción de los valores de escala para el parámetro de extensión del contaminante 159
Cuadro 47. Descripción de los valores de escala para el parámetro de daño causado al factor ambiental 160
Cuadro 48. Descripción de los valores de escala para el parámetro de resiliencia del factor ambiental 161
Cuadro 49. Valoración de la gravedad de las consecuencias del escenario de riesgo 161
Cuadro 50. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas en la cuenca del río Agujas 164
Cuadro 51. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas en la cuenca de playa Colorada 165
Cuadro 52. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por residuos sólidos en la cuenca del río Agujas 170
Cuadro 53. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por residuos sólidos en la cuenca de playa Colorada 170
Cuadro 54. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación relativo a actividades agropecuarias en la cuenca del río Agujas 174
Cuadro 55. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación relativo a actividades agropecuarias en la cuenca de playa Colorada 174

Cuadro 56. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por deforestación en la cuenca del río Agujas 178
Cuadro 57. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por deforestación en la cuenca de playa Colorada 178
Cuadro 58. Caracterización de riesgos por contaminación en cuerpos de agua superficiales en la cuenca del río Agujas 185
Cuadro 59. Caracterización de riesgos por contaminación en cuerpos de agua superficiales en la cuenca de playa Colorada 188

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ASADA - Asociaciones administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados comunales

ASP – Área Silvestre Protegida

$DBO_{(5,20)}$ – Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días a 20 °C de temperatura

DQO – Demanda Química de Oxígeno

EPA – Agencia de Protección Ambiental (siglas en inglés)

GIRS – Gestión Integral de los Residuos Sólidos

IDS – Índice de Desarrollo Social

INEC – Instituto Nacional de Estadística y Censos

INDER – Instituto de Desarrollo Rural

INISA – Instituto de Investigaciones en Salud

LIA – Laboratorio de Ingeniería Ambiental

MAG – Ministerio de Agricultura y Ganadería

MED – Modelo de Elevación Digital

MIDEPLAN – Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

NASA – Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (siglas en inglés)

OD – Oxígeno Disuelto

ONG – Organización No Gubernamental

PDRT – Plan de Desarrollo Rural territorial

PN – Parque Nacional

PSO – Porcentaje de Oxígeno Disuelto

RB – Reserva Biológica

SCL – *Scan Line Corrector*

SDT – Sólidos Disueltos Totales

SINAC – Sistema Nacional de Áreas de Conservación

SINIGIRH - Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico

SNIT – Sistema Nacional de Información Territorial

TEC –Tecnológico de Costa Rica

TM – Mapeo Temático (siglas en inglés)

RGB – *Red-Green-Blue*

UFCO – *United Fruit Company*

USGS – Servicio Geológico de los Estados Unidos (siglas en inglés)

Castillo Campos, María Gabriela.

Evaluación de riesgos de contaminación relativos a los cuerpos de agua superficial en la subcuenca del río Agujas y la subcuenca de las quebradas de playa Colorada en Bahía Drake de Osa, Puntarenas.
Proyecto de graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica:
M.G. Castillo C., 2021
224.: ils. col.- 46 refs.

La evaluación de riesgos ambientales constituye una herramienta que permite delimitar, caracterizar y analizar los elementos o sucesos que se identifiquen como amenazas asociadas a un factor ambiental específico definido como parte de un escenario de exposición particular. En el presente proyecto se presenta la implementación de esta metodología a los cuerpos de agua principales definidos en las cuencas del río Agujas y las quebradas de playa Colorada.

El procedimiento definido consiste en la caracterización morfométrica, del uso del suelo, aspectos socioeconómicos, pruebas de calidad del agua e información territorial del escenario de exposición, de manera que sea posible identificar las amenazas ambientales y su respetivo análisis, para lo que se empleó la metodología de análisis por árbol de fallo de los sucesos iniciadores determinados. Seguidamente se procede con una estimación cuantitativa del riesgo ambiental como el producto de la probabilidad de ocurrencia y la gravedad de las consecuencias.

La definición de un valor de riesgo en una escala concreta permite establecer recomendaciones para cada una de las cuencas de forma particular y priorizada según sus condiciones específicas. Asimismo, la metodología desarrollada permite su implementación en el futuro o en zonas con condiciones similares. M.G.C.C.

DESCRIPTORES CONCEPTOS CLAVE: RIESGO AMBIENTAL, CUENCAS HIDROGRÁFICAS, MATRIZ DE EVALUACIÓN, CALIDAD DEL AGUA

Ing. Paola Vidal Rivera
Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La Península de Osa, ubicada al sureste del país, es considerada "uno de los puntos de mayor intensidad biológica del mundo", según señala el Plan de Desarrollo Rural Territorial (PDRT) 2017-2022 presentado por el Instituto de Desarrollo Rural (INDER), sin embargo, en este mismo documento se menciona esta como una de sus dos zonas prioritarias de atención en el eje de ecosistemas territoriales. Esto implica un rezago en los siguientes indicadores: desarrollo y fortalecimiento de capacidades para el manejo integral y uso sostenible de los recursos, ordenamiento territorial y gestión integrada del recurso hídrico y marino costero, manejo de residuos y desechos sólidos y líquidos, pago por servicios ambientales, negocios verdes y gestión al riesgo de desastres y adaptación (Instituto de Desarrollo Rural, 2017).

Dada la evidencia de diversas problemáticas, se presenta una evaluación de los riesgos de contaminación relativos a los cuerpos de agua superficial en la subcuenca del río Agujas y la subcuenca de las quebradas de playa Colorada, ubicadas en el distrito de Bahía Drake, el cual fue fundado en el 2012, y forma parte del cantón de Osa en la provincia de Puntarenas. Para esto se realiza la caracterización de las cuencas, así como de la calidad y condición de los principales cuerpos de agua mediante datos teóricos y dos visitas de campo a la zona de estudio, lo cual permitió identificar y verificar las amenazas que afecten la calidad del agua del río Agujas y las quebradas de El Mono y Don Carmen, específicamente.

Finalmente, las amenazas identificadas se analizan tomando en cuenta la caracterización del medio, con lo que se definieron los escenarios de riesgo, que al ser caracterizados permiten presentar recomendaciones que procuran el mejoramiento de las condiciones existentes, tomando como principio que sean accesibles y viables para la población, y que, a su vez tengan el impacto requerido.

1.1 Justificación

Jean-Baptiste Livenais, señala que el distrito de Bahía Drake, y más específicamente Agujitas, que es su centro poblacional más densificado, ha experimentado una expansión turística que inicia cerca del 2004 y se mantiene hasta el momento de la publicación de su tesis de maestría en el 2009 (Livenais, 2009). Posteriormente, en un estudio realizado en el 2016 por la Oficina Subregional de Osa, se confirma la consistencia de este comportamiento, al señalar que se ha

dado un crecimiento de ecoturismo en la zona en desde la mitad de la década de 1990 y hasta su publicación del estudio, el cual además señala que esta actividad es la principal fuente de empleo (Oficina Regional de Osa, 2016).

Lo anterior, es de esperarse dado que Osa expone una biodiversidad abundante, pues se concentra una gran variedad de especies de flora y fauna únicas o de distribución reducida en este pequeño espacio, lo cual se relaciona a procesos geológicos, climáticos y biológicos. Por lo que, aunado a las políticas conservacionistas y de desarrollo sostenible, principalmente relacionado al Parque Nacional Corcovado y la Reserva Forestal Golfo Dulce, redundan en la explicativa del aumento del ecoturismo, en el que Bahía Drake se posiciona en un punto geográfico estratégico (Oficina Regional de Osa, 2016).

Esta información toma relevancia para el centro poblacional de Agujitas, donde se concentran los comercios y puntos de recepción para los visitantes. Sin embargo, según el Plan de Desarrollo Rural Territorial de Osa 2017, esta realidad se contrasta con índices de desarrollo social de nivel bajo a muy bajo, índices de desarrollo distritales muy bajos, bajos niveles de escolaridad, y en general, indicadores socioeconómicos en condición de rezago, los cuales evidencian las carencias y las limitaciones existentes en Bahía Drake, a pesar de la riqueza de recursos con la que cuenta.

Dado lo anterior, en este tipo de situaciones, es común que los rápidos crecimientos que conllevan el aumento de una o varias actividades productivas, aunados a condiciones de escasez de servicios básicos y bajos índices de desarrollo de infraestructura, se manifiesten en contaminación al medio ambiente, donde los cuerpos de agua superficiales son unos de los principales afectados, así como, unos de los principales indicadores de la situación en la que se encuentra la zona (Instituto de Desarrollo Rural, 2017).

Seguidamente, en lo que corresponde a la zona definida por la cuenca del río Agujas, existe poca información disponible en lo que se refiere a las actividades económicas que se realizan. Aun así, es relevante la consideración de que los sembradíos de palma africana y la ganadería son unas de las principales actividades económicas del distrito de Bahía de Drake, según el Plan de Desarrollo para la Península de Osa (Oficina Subregional de Osa; Amador, S, 2016).

Aunado a lo anterior, la zona de Bahía Drake se define como ambientalmente frágil, dada la topografía, precipitación y patrones de escorrentía, ya que estos influyen directamente en la

cantidad y calidad del agua que eventualmente llegará a los cuerpos de agua, así como el tiempo de retención hidráulica que tengan las cuencas. Además, se trata de un bioclima de Bosque muy húmedo, el cual se relaciona con procesos de erosión que afectan directamente los cuerpos de agua superficiales, procesos que se ven intensificados con la deforestación, incremento de pastizales y asentamientos humanos en zonas no aptas (Livenais, 2009).

Asimismo, se debe tomar en cuenta que, a pesar de la importancia de la zona, la información relativa a sus condiciones ambientales es bastante escasa. De manera que, es necesario determinar las amenazas existentes producto de estos cambios culturales, de uso de suelo y demográficos que se presentan en una zona de relevante biodiversidad para el país, con el fin de brindar recomendaciones que puedan ser aplicadas en la zona para reducir el impacto antropogénico que implican dichas actividades.

1.2 Problema específico

El problema se presenta específicamente en el desconocimiento por parte del gobierno local, instituciones del estado así como no gubernamentales, actores sociales con capacidad de acción y de la población en general, de las condiciones actuales en las que se contextualiza el crecimiento urbano de Agujitas, como centro poblacional de Bahía Drake, producto del aumento del turismo como principal actividad comercial en la zona, aunado a deficiencia en el abastecimiento de servicios básicos a los habitantes, tales como abastecimiento de agua potable, captación de aguas residuales, limpieza de vías, entre otros. Lo que se ve reflejado en la contaminación de los cuerpos de agua superficiales, en este caso específico a la quebrada Don Carmen y la quebrada de El Mono que desembocan en playa Colorada.

Asimismo, a esto también se le suma las condiciones en las que las actividades productivas se desarrollan, principalmente agrícolas y de ganadería, en lo que corresponde a la cuenca del río Agujas, que es uno de los principales ríos de Bahía Drake (Instituto de Desarrollo Rural, 2017). Igualmente, para este caso se desconocen las condiciones actuales de calidad del cuerpo de agua, y el riesgo ambiental que representan las actividades que actualmente se realizan.

Lo anterior, representa una amenaza a la calidad de los cuerpos de agua, aunado a que se previsualiza como de alta permanencia, debido a que está relacionado con actividades productivas y asentamientos humanos. Esto implica un riesgo significativo en términos

ambientales, debido a la zona en la que se encuentra. Además, para la población en general, los ríos implican una fuente de ingreso o para alimentación de subsistencia, pues se practica la pesca artesanal (Oficina Regional de Osa, 2016).

1.2.1 Importancia

La evaluación de riesgos ambientales busca prevenir la contaminación, o bien su disminución por medio de la inclusión de medidas correctivas, que reduzcan la magnitud o peligrosidad de las amenazas (Dirección General de Calidad Ambiental, 2010). De manera que, para la zona de estudio en específico es relevante la aplicación de esta metodología con el fin de definir los peligros que la afectan producto del cambio en las condiciones del medio circundante. De modo que se puedan recomendar medidas específicas necesarias, para lo cual se centra una principal atención en Agujitas, también conocido como Drake, y con mayor crecimiento en los últimos años; así como en las partes altas de la cuenca del río Agujas, donde se registra un mayor cambio en el uso del suelo (Oficina Regional de Osa, 2016).

Como se mencionaba, Agujitas es el principal centro poblacional, el cual se localiza en la subcuenca de las quebradas de playa Colorada, que corresponde a una pequeña subcuenca exorreica de la que se cuenta con poca información disponible. Por ejemplo: se desconoce la permanencia en el tiempo de las quebradas o riachuelos que la conforman, además de que no se cuenta con registros históricos de la calidad del agua o su caudal. De modo que, de existir niveles de contaminación altos, el impacto a la desembocadura será significativo debido a la baja capacidad de autodepuración esperada, dada el área de drenaje.

Por otro lado, el río Agujas corresponde a uno de los principales ríos de Bahía Drake, y define una de las subcuencas con mayor área de Osa. En la cual, según el PDRT de la Oficina Regional de Osa, se ha dado un cambio en el uso del suelo relativo a una conmutación en las actividades productivas de la zona, por lo que es importante identificar la magnitud del cambio en la cobertura del suelo, así como las consecuencias asociadas, lo cual muestra lo relevante mantener un enfoque de análisis en el que se defina la cuenca como unidad de estudio (Oficina Regional de Osa, 2016).

1.2.2 Antecedentes teóricos históricos de la zona de estudio

La Península de Osa se ha constituido como una zona de vasto recorrido en el país, marcada por movimientos demográficos y sociales bruscos. El evento que marca el inicio de estas grandes fluctuaciones es el establecimiento de la *United Fruit Company* (UFCO) en Puerto Jiménez desde 1936, y posteriormente en 1941, entra en funcionamiento el muelle de Golfito, el cual era el principal centro de operaciones del enclave bananero. Seguidamente, la siguiente ola migratoria se dio producto de la construcción de la Carretera Interamericana entre 1947 y 1963, lo que logró una mejor comunicación entre la zona Sur y el resto del país. Como consecuencia de esto, se da la tala de bosques para la cría de cerdos, ganado y otros productos para la venta (Oficina Subregional de Osa; Amador, S, 2016).

Aunado a esto, en 1957, la compañía maderera estadounidense, Osa Productos Forestales compra una importante cantidad de terrenos en la península, gran parte de estos se localizan en lo que ahora es Bahía Drake, que corresponde a la zona de estudio. Esta situación, más adelante desarrolla conflictos por las tierras entre la compañía, campesinos y migrantes recientes que llegaban a reclamar terrenos (Rosero-Bixby, 2002).

Lo anterior, sumado a la participación de muchos científicos que visitaron la zona y despertaron sentimientos conservacionistas, conlleva a la intervención del Estado, que opta por el establecimiento de Áreas Protegidas con el fin de aplacar los conflictos por tierra, y así mismo preservar la riqueza en biodiversidad. En 1975 se crea el Parque Nacional Corcovado, en 1978 la Reserva Forestal Golfo Dulce y en 1981, la Reserva Indígena Guaimí.

Sin embargo, posterior a la resolución de conflictos por este medio, las comunidades de la Península de Osa son las que han tenido que buscar la integración social, pues a esta situación se le suma el retiro en 1984 de la UFCO, lo que implica un golpe duro para la economía y la cultura en el marco del ordenamiento territorial, principalmente relacionado con el cambio en las actividades productivas típicas de la zona y su dependencia a el enclave (Oficina Subregional de Osa; Amador, S, 2016).

Al final de la década de 1980 la situación socioeconómica y ambiental era grave, dada la explotación de recursos naturales manifestada en la extracción de metales preciosos, flora, fauna, recursos del mar y la explotación agroforestal sin planificación o inspección. Además de

lo anterior, el cantón sufría otros problemas que los mismos gobernantes declararon como "amenaza para la paz social", debido a la falta de atención en salud, el alto desempleo, la incomunicación con el resto del país durante la época lluviosa, la falta de asistencia técnica al sector agropecuario y pesquero, además de acceso a educación (Mora D. A., 2007).

Posterior a esto, se han concretado algunos proyectos como la conexión entre Chacarita y Puerto Jiménez, con lo cual se logra la integración de la Península de Osa al territorio regional y nacional por la vía terrestre. Más recientemente, otro proyecto relevante para la zona de estudio es el asfaltado de la carretera entre Palmar y Sierpe, alrededor del 2007, lo que agilizó la conexión hacia Bahía Drake, antes solo posible por la vía acuática. No obstante, en estudios más recientes, como el presentado por el centro Iniciativa Golfito y Osa, resaltan la persistencia de deficiencias en términos de pobreza, rezago de oportunidades laborales y desarrollo sostenible, además de la afirmación de que estas falencias se encuentran estrechamente ligadas (Román & Ángulo, 2013).

1.2.3 Legislación y reglamentos vigentes aplicables

En cuanto a lo que corresponde a la legislación aplicable para la zona de estudio, es importante mencionar que el cantón de Osa posee un plan regular vigente desde 1984, con la última versión actualizada en el 2001. No obstante, en el 2010, por petición del municipio, el Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS) de la Universidad de Costa Rica hizo unas propuestas de mejora al plan vigente, basados en estudios multidisciplinarios realizados en la zona, pero finalmente no fueron acogidas en su totalidad por el municipio.

Según la versión vigente del plan regulador, en lo que corresponde a la zonificación del cantón, para la subcuenca del río Agujas se le asigna una categorización de zona llana de intervención baja para la parte baja de subcuenca, mientras que la parte media y alta corresponde a la Reserva Forestal Golfo Dulce. Esto significa que, dadas las condiciones naturales de vulnerabilidad, baja accesibilidad y la cercanía a zonas con mejores condiciones, en una zona llana de intervención baja las actividades permitidas están limitadas a las relacionadas con el ecoturismo. Aunado a esto, el mismo plan regulador establece que es necesario que se dé un manejo responsable de las aguas residuales en esta zona, acorde con las condiciones físicas del terreno, debido a la cercanía con la costa y los humedales (Municipalidad de Osa, 2021).

En lo que corresponde a la Reserva Forestal de Golfo Dulce, esta zona se creó en 1978 y por con el fin de la producción maderera, pues sus terrenos son especialmente aptos para este uso, la cual es reforestada gradualmente de acuerdo con el principio de uso adecuado y sostenible de los recursos naturales renovables. Su principal fin es la protección de los recursos genéticos forestales, esto es el material hereditario conservado en los árboles y otras especies leñosas, para asegurar la producción forestal a largo plazo. Aunado a esto, como las reservas forestales también corresponde a zonas habitables, estas también fueron creadas con la intención de generar empleo, además de un incremento del nivel de vida de la población rural, mediante su efectiva incorporación a las actividades silviculturales (R-SINAC-CONAC-033-2019, 2019).

Para el caso de la subcuenca de playa Colorada, en la que se encuentra la comunidad de Agujitas, por su posición estratégica cercana a la costa, se establece como una zona de actividad humana dispersa, específicamente para actividades turísticas de baja intensidad. La limitación en las actividades se debe a que el plan regulador ha propuesto zonas con niveles de intervención turística más altos, las actividades que se desarrollarán en esta zona corresponderán a impactos más bajos que en los núcleos consolidados definidos igualmente por el plan regulador (Municipalidad de Osa, 2021).

Seguidamente, en lo que corresponde a la determinación de amenazas, específicamente para la evaluación de la calidad de agua la reglamentación vigente utilizada es el Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. Este reglamento fue publicado en el diario oficial La Gaceta en setiembre del 2017, y su objetico primordial es reglamentar los criterios y metodologías utilizados para la evaluación de la calidad de los diferentes cuerpos de agua superficiales, con lo que consecuentemente se pueda hacer una clasificación en función de los usos que se le puedan dar al agua.

Este reglamento, en el capítulo II presenta los parámetros fisicoquímicos requeridos para la clasificación del cuerpo de agua según el Índice Holandés de Valoración de la Calidad para los cuerpos de agua superficiales, los cuales son el porcentaje de saturación de oxígeno (% OD o PSO), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y el nitrógeno amoniacal. Este método consiste en la asignación de puntos según el nivel de contaminación que cada parámetro indique. Posteriormente, los puntos de cada categoría se suman y el resultado se traslada a un código de colores que clasifica la calidad del agua según el grado de contaminación. Esta

categorización va del 1 al 5, lo que abarca desde sin contaminación hasta contaminación muy severa.

En el Cuadro 1 se presentan los rangos de puntos para cada clase, así como la interpretación de calidad y el código de color asociado.

Cuadro 1. Asignación de clases de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores, basado en valores de PSO, DBO y nitrógeno amoniacal

Clase	Sumatoria de puntos	Código de color	Interpretación de calidad
1	3	Azul	Sin contaminación
2	4 - 6	Verde	Contaminación incipiente
3	7 - 9	Amarillo	Contaminación moderada
4	10 - 12	Anaranjado	Contaminación severa
5	13 - 15	Rojo	Contaminación muy severa

Fuente: (Gobierno de Costa Rica , 2007)

Aunado a esta metodología de clasificación, el reglamento también presenta un listado de 24 parámetros que define como complementarios, dos parámetros orgánicos y uno biológico. Estos según se señala en el artículo 5 se deberán analizar cuando el Ministerio de Salud o el Ministerio de Ambiente y Energía lo consideren necesario. En el presente estudio se consideraron algunos de estos parámetros complementarios, así como el parámetro biológico, esto en función de las posibilidades de realización de la prueba y la pertinencia del parámetro en específico al estudio.

Finalmente, el reglamento indica un listado de potenciales usos y el tratamiento sugerido para cada clase definida. A continuación, se presentan los usos más afines a la zona de estudio, y la respectiva categorización.

Cuadro 2. Nivel de tratamiento sugerido para cada clase según clasificación de los cuerpos de agua superficiales

Usos	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Abastecimiento de agua para actividades industriales destinadas a la producción de algunos alimentos de consumo humano	Sin tratamiento previo o con tratamiento simple de desinfección	Con tratamiento convencional	Con tratamiento avanzado	No utilizable	No utilizable
Abastecimiento de agua para abrevadero y actividades pecuarias	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Sin limitaciones	Con limitaciones	No utilizable
Actividades recreativas de contacto primario	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Acuacultura	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Fuente para la protección de las comunidades acuáticas	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable
Riego de plantas sin limitación, irrigación de hortalizas que se consumen crudas o de frutas que son ingeridas sin eliminación de la cáscara	Utilizable	Utilizable	No utilizable	No utilizable	No utilizable

Fuente: (Gobierno de Costa Rica , 2007)

1.2.4 Delimitación del problema

Alcance

El proyecto está delimitado geográficamente al área correspondiente a la subcuenca del río Agujas, siendo esta una de las principales cuencas de la zona de Osa y la subcuenca de las

quebradas de playa Colorada. Las cuales se localizan en el distrito de Bahía Drake en el cantón de Osa de la provincia de Puntarenas, lo cual se puede apreciar en la siguiente Figura 1.

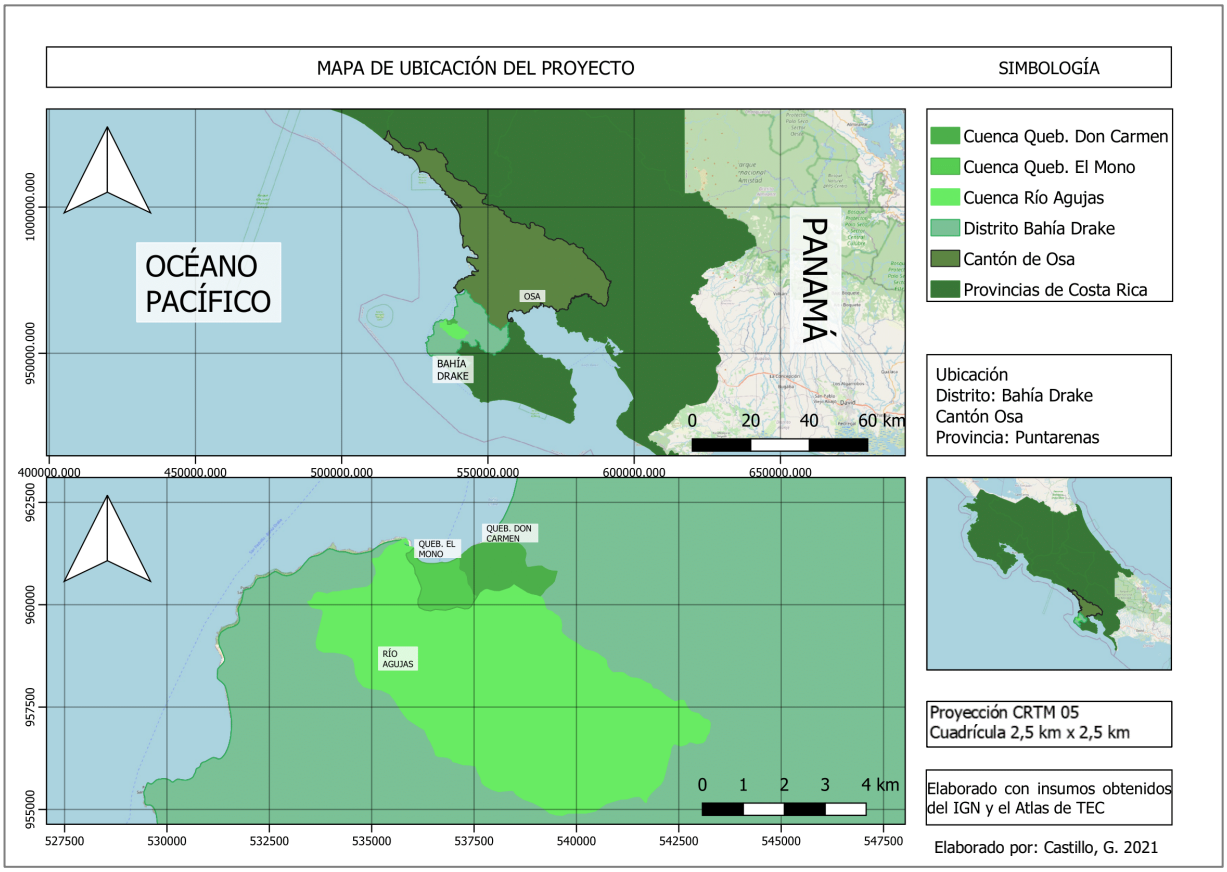


Figura 1. Delimitación de la zona de estudio

Asimismo, tanto la obtención de información en campo como la corroboración de los datos proveniente de proyectos previos, queda limitado a las dos visitas al sitio. La primera gira de campo se realizó en julio 2019, procurando tener representación de la época de transición seca a lluviosa y la segunda en febrero 2020, lo que pretende refleje datos de época seca. Específicamente para la información de calidad del agua, y el reconocimiento previo de la zona estuvo ligado con el trabajo realizado por el proyecto de investigación: "Conservación de zonas de alta densidad de biodiversidad, por medio de la caracterización de contaminantes disueltos y sólidos suspendidos en el recurso hídrico e identificación de tecnologías en salud para las zonas costeras, Península de Osa" inscrito a la vicerrectoría de investigación de la Universidad de Costa Rica (UCR), el cual tiene un periodo de vigencia del 2019 – 2021, y se encuentra actualmente en desarrollo, bajo el número identificador B9463 del Sistema de Información Y Gestión de Proyectos, Programas y Actividades de la UCR.

En lo que corresponde a la presentación de resultados, la evaluación de riesgos de contaminación es específicamente relativo a la calidad superficial de cada subcuenca. Esto definido según las variables analizadas como el uso del suelo, cambio en la cobertura del suelo en los últimos años, caracterización morfológica de la zona de estudio, la calidad del agua actual, la información específica del territorio, por ejemplo, el tipo de suelo y la información socioeconómica de la zona.

Otro aspecto importante, es que el estudio se enfoca en el análisis de las amenazas identificadas, según la evaluación del riesgo de contaminación ambiental, que son específicamente originados por causas antropogénicas. Es decir, que la fuente de contaminación es producto de actividades humanas, como industria, agricultura, construcción, urbanización y deforestación.

El protocolo para la toma de muestras, los parámetros de calidad de agua medidos y su rango de comparación se establecieron con base en lo que dicta el reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficial, en contraposición con el acceso a las pruebas y la factibilidad de realización dado el procedimiento mismo de pruebas de calidad de agua y el acceso a la zona para la toma de las muestras.

Dado lo anterior, no se realizaron todas las pruebas mencionadas en dicho reglamento, sino las más representativas para la zona y el tipo de estudio. Lo cual también estuvo sujeto a la disponibilidad de activos y reactivos en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental (LIA) y el Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), ambos pertenecientes a la Universidad de Costa, en donde se realizaron las pruebas.

Limitaciones

El presente proyecto se limita a analizar las amenazas a la calidad del agua de fuentes antropogénicas establecidas a partir de los riesgos de contaminación identificados en la zona de estudio, según la información disponible recopilada y el modelaje realizado. Lo que implica que tanto el estudio como los resultados obtenidos están a su vez limitados por la calidad y cantidad de la información accesible.

Lo cual representa una limitante significativa para la definición de los parámetros de calidad del agua, pues se basa mayoritariamente en los muestreos realizados en las dos giras de

campo. Asimismo, es relevante mencionar que la zona de estudio es un sitio de difícil acceso y alejada de donde la Ciudad de Investigación de la Universidad de Costa Rica donde se realizará el análisis de muestras provenientes de campo, lo que implicó diversas perturbaciones de los resultados obtenidos, y la pérdida de muestras por completo dependiendo del parámetro a evaluar.

Asimismo, no se cuenta con información de la calidad del agua previa para las quebradas de El Mono y Don Carmen, también conocidas como quebradas de playa Colorada. Además, de esta última, se desconoce en su totalidad, por falta de registro histórico, si se trata de una quebrada intermitente o perenne, así como su distribución espacial, pues estas no se encuentran en la información de ríos del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT), en el Atlas del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), o en los datos disponibles por la Dirección de Aguas (DA) o el Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC).

En lo que corresponde al análisis de ocupación y cambio de uso del suelo del área de estudio en el tiempo, se limita a la calidad y disponibilidad del registro de fotografías áreas existente. Aunado al hecho de que Bahía Drake fue declarada mediante ley como distrito en agosto del 2012, por lo que sus datos poblaciones no están incluidos en los censos realizados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (INEC) en el 2011. De modo que la información disponible se encuentra agregada a los datos de Sierpe (Oficina Subregional Osa, 2016).

Respecto al modelo de elevación de las subcuencas, se utilizaron los datos geomorfológicos disponibles en el Atlas del Instituto Tecnológico de Costa Rica, aunado a los datos del geoportal del Sistema Nacional de Información Territorial. Esto es significativo debido a que las curvas de elevación disponibles son de escala 1: 50 000, lo que representa un detalle limitado, sin embargo, esto se debe a que se trata de una zona de difícil acceso.

1.3 Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos del estudio.

1.3.1 Objetivo general

- Realizar una evaluar de los riesgos de contaminación de los cuerpos de agua superficial provenientes de fuentes antropogénicas de la subcuenca del río Agujitas y la subcuenca de la quebrada de playa Colorada en Bahía Drake de Osa, por medio de la recopilación de información tal que se pueda realizar un diagnóstico, con el fin de establecer recomendaciones.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico que incluya la caracterización morfológica, del uso de suelo, información territorial y socioeconómica de la zona de estudio, así como de la calidad de sus cuerpos de agua principales.
- Analizar los escenarios de riesgo planteados producto del diagnóstico de la zona de estudio, por medio de esquemas metodológicos utilizados en la conformación de la caracterización del riesgo de forma cuantitativa.
- Realizar recomendaciones de acuerdo con los riesgos de contaminación identificados, en busca del saneamiento ambiental, y la prevención de riesgos pasivos.

1.4 Descripción de la metodología

La metodología empleada para el desarrollo del proyecto está compuesta de tres etapas, según la metodología de evaluación de riesgos definida. La primera etapa corresponde a la caracterización de las subcuencas, esto se refiere a su morfología mediante un modelo geográfico realizado en el programa QGIS, del uso y cobertura del suelo, la información específica del territorio, datos demográficos y socioeconómicos, pruebas de calidad del agua, entre otros. Para lo cual se utilizan datos teóricos provenientes de estudios previos y distintas fuentes, además de las visitas de campo a la zona, las cuales son imprescindibles para realizar el proyecto.

Específicamente se realizaron dos giras una en julio del 2019 que pretende representar la época transitoria seca-lluviosa y otra en época seca en febrero del 2020. En ambas se hace la colección de muestras en los diferentes puntos definidos en el recorrido de los cuerpos de agua, esto será más ampliamente abordado en el proyecto. Aunado a esto, en las giras de

campo se hace una inspección visual para generar un registro fotográfico que demuestre las amenazas identificadas. Seguidamente, toda la información recopilada en campo se procede a ser examinada y verificada en contraposición con los datos teóricos obtenidos.

Una vez que se cuenta con una caracterización completa del escenario de exposición definido, se procede con la segunda etapa, esta corresponde al análisis de las amenazas ambientales con el fin de definir una estimación de la gravedad de las consecuencias asociadas a cada amenaza, así como la probabilidad de ocurrencia. Para lo cual, se consideran las posibles fuentes de contaminación, lo que permite definir escenarios de riesgos, los cuales se agrupan según comparten los mismos sucesos. Seguidamente, se realiza un análisis de los escenarios de riesgo planteados para cada suceso iniciador identificado, de lo que se extraen los factores condicionantes, que son a los que se les asigna un valor numérico de probabilidad y de gravedad, de modo que se define el riesgo asociado. Esta metodología en específico es abordada más adelante.

A partir de esta información, es posible trabajar la tercera etapa del proyecto, que corresponde a la formulación de recomendaciones según la caracterización del riesgo lo que define el nivel de prioridad que se le asigna. Las recomendaciones se plantean con el fin de que procuren el mejoramiento de las condiciones en la zona de estudio específicamente para cada amenaza según los resultados obtenidos, así como las conclusiones correspondientes del proyecto.

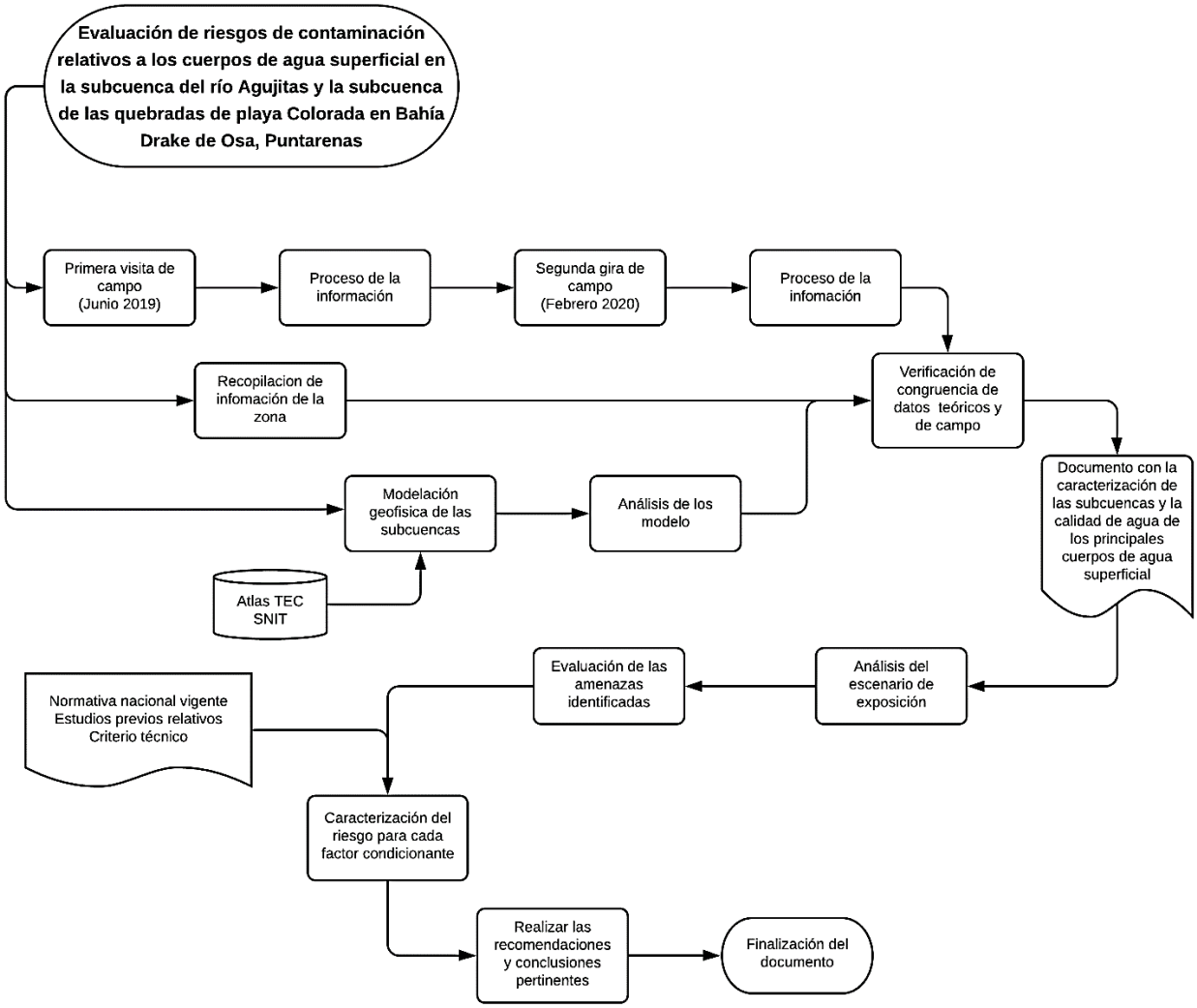


Figura 2. Diagrama de la metodología del proyecto

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

El riesgo ambiental se refiere al producto de la probabilidad y la gravedad de que un posible peligro se concrete. De modo que, la evaluación de riesgos ambientales se define como un instrumento que permite la estimación de la probabilidad de que ocurra algún peligro que afecte directa o indirectamente al ambiente, relacionado a la permanencia de condiciones o materiales considerados perjudiciales en el medio. En este proyecto en específico se analizan los relativos a la calidad del agua de los cuerpos superficiales, cuya fuente se encuentre relacionada a actividades de índole antropogénica.

El área física que hace referencia a el espacio geográfico en riesgo se conoce como el escenario de exposición. Para este tipo de estudios es relevante la consideración del medio ambiente, este corresponde al entorno vital que comprende factores físico-naturales, sociales, culturales, económicos y estéticos que interactúan tanto entre sí como con los habitantes de la comunidad, de forma individual y colectiva. El concepto de medio ambiente es muy amplio y abarca todos los temas de biodiversidad, calidad ambiental, salud y seguridad pública, peligros principales y la contaminación del predio (Rojas, 2005).

Aunado a lo anterior, cualquier acción o actividad que produzca una alteración, ya sea favorable o adversa, en el medio ambiente o alguno de sus componentes se conoce como un impacto ambiental. El cual puede ser clasificado según diferentes aspectos, incluyendo: variación de la calidad ambiental, esto es si es positivo o negativo, su intensidad o grado de influencia, extensión, momento de manifestación, que hace referencia a si el impacto perdura en el corto, mediano o largo plazo, persistencia, que se refiere a si el efecto es temporal o permanente, capacidad de recuperación y periodicidad.

En el caso en que no se haya producido el efecto o impacto, se hace la evaluación de los peligros o amenazas que puedan representar una variación de la calidad ambiental que comprometa la calidad del agua, aire o suelo y que, por ende, ponga en riesgo la salud del ser humano o la biodiversidad como consecuencia de la exposición a la fuente contaminante en un lugar y tiempo determinados.

Por el contrario, en el caso de que el impacto ambiental ya se haya producido, específicamente cuando se trata de un efecto negativo producto de un contaminante externo, se debe

considerar la ruta de exposición de este, esto hace referencia a la trayectoria o recorrido que tiene el contaminante, por lo que implica definir la fuente de emisión hasta el cuerpo receptor identificado como potencialmente expuesto. Asimismo, es importante estimar la exposición, lo cual hace referencia a la determinación de la magnitud del contaminante que está en contacto con el cuerpo receptor durante el periodo de exposición (Dirección General de Calidad Ambiental, 2010).

2.1 Evaluación de riesgos ambientales

La evaluación de riesgos ambientales es el proceso mediante el cual se determina si existe una amenaza potencial al medio ambiente en el escenario de exposición definido. Asimismo, permite estimar la probabilidad de que ocurra algún daño por la presencia de condiciones o contaminantes peligrosos que conlleven a un impacto negativo. En términos generales, el proceso se puede definir en tres etapas, que son el análisis del medio, la evaluación de las amenazas identificadas y la caracterización de los riesgos (Ministerio de Ambiente de Perú, 2010).

2.1.1 Análisis del medio

El proceso de análisis del medio tiene tres diferentes etapas, la primera es la identificación de peligros, la segunda es la determinación del escenario y, por último, el análisis del escenario planteado. Entonces, la primera etapa sugiere el estudio de los peligros o amenazas, para lo cual es de suma importancia delimitar el escenario de exposición, así como los aspectos del medio a ser evaluados, para posteriormente, recopilar información sobre las características del ámbito, tales como: superficie, tipo de posibles fuentes contaminantes, posibles sustancias y contaminantes del medio, vulnerabilidad del entorno, entre otros. Aunado a esto, se debe verificar el cumplimiento de los instrumentos de gestión autorizados y aprobados por el sector competente, que en este caso será el gobierno local de Osa. Así como la reglamentación vigente que aplique a la regulación de cuerpos de agua superficiales (Ministerio de Ambiente de Perú, 2010).

La segunda etapa corresponde a la determinación del escenario, esto es la recopilación de información que permita establecer un escenario de exposición conocido, de manera que se pueda determinar los peligros que representen un riesgo para el medio. En este caso específico,

como la unidad de estudio definida es la cuenca hidrográfica, es relevante su caracterización para poder entender la respuesta del medio a los diferentes estímulos. En este sentido, es necesaria también la caracterización de los cuerpos de agua superficiales, para poder definir el impacto ambiental de las actividades que se realizan.

La tercera etapa corresponde al análisis del escenario planteado en función de determinar los posibles sucesos iniciadores, dadas las amenazas por contaminación de los cuerpos de agua superficial. Para lo cual, se consideran las fuentes contaminantes que en general representen una amenaza para la calidad del agua, como lo son (Dirección General de Calidad Ambiental, 2010):

- Vertido de aguas residuales de origen doméstico a los cuerpos de agua, que mayormente se compone de materia orgánica, por lo que requiere del oxígeno del medio para su oxidación, afectando la calidad del medio. Además, las aguas domésticas pueden contener otros contaminantes igualmente peligrosos al medio.
- Vertido de aguas residuales especiales, relacionadas a cualquier otra actividad que no sea doméstica, lo que implica contaminación compleja para el medio.
- Inadecuada disposición de los residuos sólidos, por lo que terminan en ríos y mares, afectando a la vida acuática, pues le causan lesiones graves ya que se puede atascar en esta o los animales pueden consumirla.
- Uso de pesticidas y fertilizantes, tanto de uso doméstico como a mayor escala, debido a que la escorrentía superficial provoca el arrastre hacia los cuerpos de agua, produciendo un desequilibrio del balance natural de los nutrientes en el agua.
- Derrames de petróleo, el cual representa el tercer mayor contaminante en cantidad del agua en el mundo, además sus efectos son devastadores para la vida acuática.
- La deforestación es una amenaza para la calidad del agua, pues se producen procesos de erosión en el suelo, o bien el material particulado que normalmente se hubiera almacenado en el suelo es más propenso a ser arrastrado hacia los cuerpos de agua.
- La minería es una actividad sumamente amenazante para la calidad del agua, pues se producen subproductos dañinos para el medio y son de gran riesgo en caso de ser almacenados, además de que los minerales extraídos se pueden desprender y ser arrastrados por la escorrentía hacia los cuerpos de agua.

- La ganadería puede resultar una amenaza a la calidad del agua debido a los desechos que se producen como el excremento de los animales u otros desechos que terminan degradándose en el medio, e inclusive cuando se practica la ganadería de forma más intensiva, se registra la contaminación en forma de fármacos como los antibióticos y hormonas que se usan en el ganado.

Una vez valoradas las amenazas, en relación con las características del medio, y cuales son significativas para este, se procede a identificar y definir las posibles causas y efectos de las amenazas identificadas. Esto bajo el marco de interrelación de la dimensión social, económica y ambiental, para lo cual se hace de suma importancia verificar el marco legal determinado. En el siguiente esquema se presenta la relación entre las distintas dimensiones planteadas.

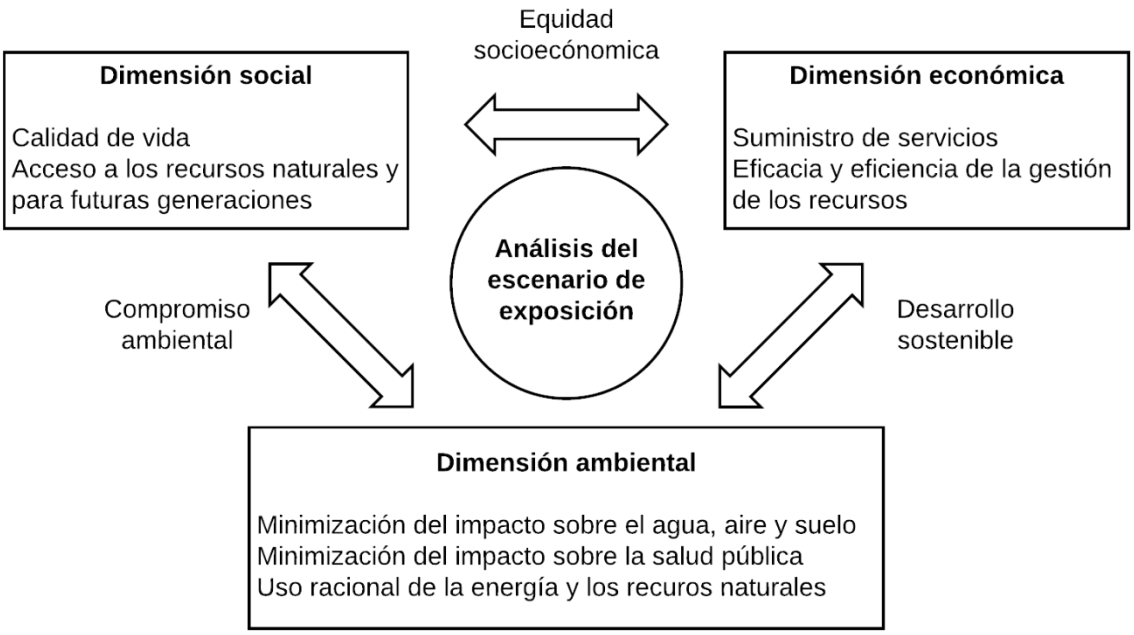


Figura 3. Interrelación de las dimensiones social, ambiental y económica en el escenario de exposición
Fuente: (Ministerio de Ambiente de Perú, 2010), modificado por el autor

En este sentido es necesario la identificación de peligros activos y pasivos, es decir, los que se dan actualmente y los potenciales identificados. Para esto se debe cuestionar las modificaciones, y posibles sucesos indeseados, el incumplimiento de la implementación o desarrollo de los instrumentos de gestión ambiental. A continuación, se presenta el Cuadro 3

que contiene una propuesta para la identificación de sucesos iniciales, con el objetivo de funcionen como insumo para la creación del escenario de riesgo. Este proceso se debe complementar con la visita de campo para hacer una valoración más precisa de las condiciones del medio.

Cuadro 3. Identificación típica de las fuentes de peligro

Socioeconómico	Ecológico	Humano
Bajo nivel de ingresos para cubrir necesidades básicas	Tala de especies forestales de forma indiscriminada	Falta de educación ambiental, relativo a problemas culturales
Baja oferta laboral	Irrespeto de áreas protegidas, parques nacionales, reservas forestales	Generación de efluentes contaminantes
Deficiente nivel organizacional	Alteración del paisaje natural	Generación de residuos sólidos
Baja participación de la población en trabajos comunales	Manejo inadecuado de los recursos hídricos	Inadecuada implementación de los reglamentos correspondientes
Mala planificación en el desarrollo de actividades turísticas de la zona (fuentes de empleo)	Sobreexplotación de los recursos naturales	Actividades ilícitas
Escasa o incumplimiento de la planificación urbana propuesta por el gobierno local (de haberla)	Incremento de tasa turística de forma no planificada	Escaso conocimiento o mala planificación relativa a desastres naturales
Procesos migratorios fuertes	Incremento de taladores informales	Construcción de viviendas o infraestructura
Cambio en las actividades productivas		Desconocimiento del adecuado funcionamiento de equipo
Escaso presupuesto para ejecutar infraestructura pública necesaria		Inadecuada gestión en actividades productivas
Escasez de infraestructura pública necesaria para el desarrollo urbano		

Fuente: (Ministerio de Ambiente de Perú, 2010), modificado por el autor

En la identificación de escenarios de riesgos existen diferentes metodologías, las cuales no son excluyentes en sí en la mayoría de los casos. Entre los más utilizados se encuentran los métodos comparativos, los cuales se basan en el uso de manuales técnicos, códigos y normas de diseño, listas de comprobación o el análisis histórico, y los métodos generalizados, estos pretenden analizar de forma más integral, algunos ejemplos son: el método conocido como "¿qué pasaría si…?", el análisis funcional de operabilidad, el análisis por árbol de fallos, entre otros (Canga, Cortés, & Martín, 2021).

A continuación, se presenta el esquema metodológico que se utiliza para el análisis por árbol de fallos el cual es el que se utiliza en el proyecto. En específico este ejemplo se basa en el que se propone en la norma UNE-150008-2008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental, emitida por la Asociación Española de la Normalización y Certificación en el 2008 y actualmente vigente (Gobierno Esapaña, 2008).

La construcción de un esquema metodológico, como el que se presenta en la Figura 5, conlleva el planteamiento del suceso iniciador, y de ahí se trabaja hacia atrás en la identificación de posibles sucesos que eventualmente desencadenan el suceso iniciador, para esto es importante considerar lo planteado en el Cuadro 3. Igualmente, se trabaja hacia adelante del suceso indicador, en lo que es la determinación de las posibles consecuencias asociadas al daño, esto se hace utilizando factores condicionantes, que básicamente corresponde al establecimiento de factores puntuales que puedan cambiar el resultado del daño, esto con el fin de establecer el escenario más amplio posible.

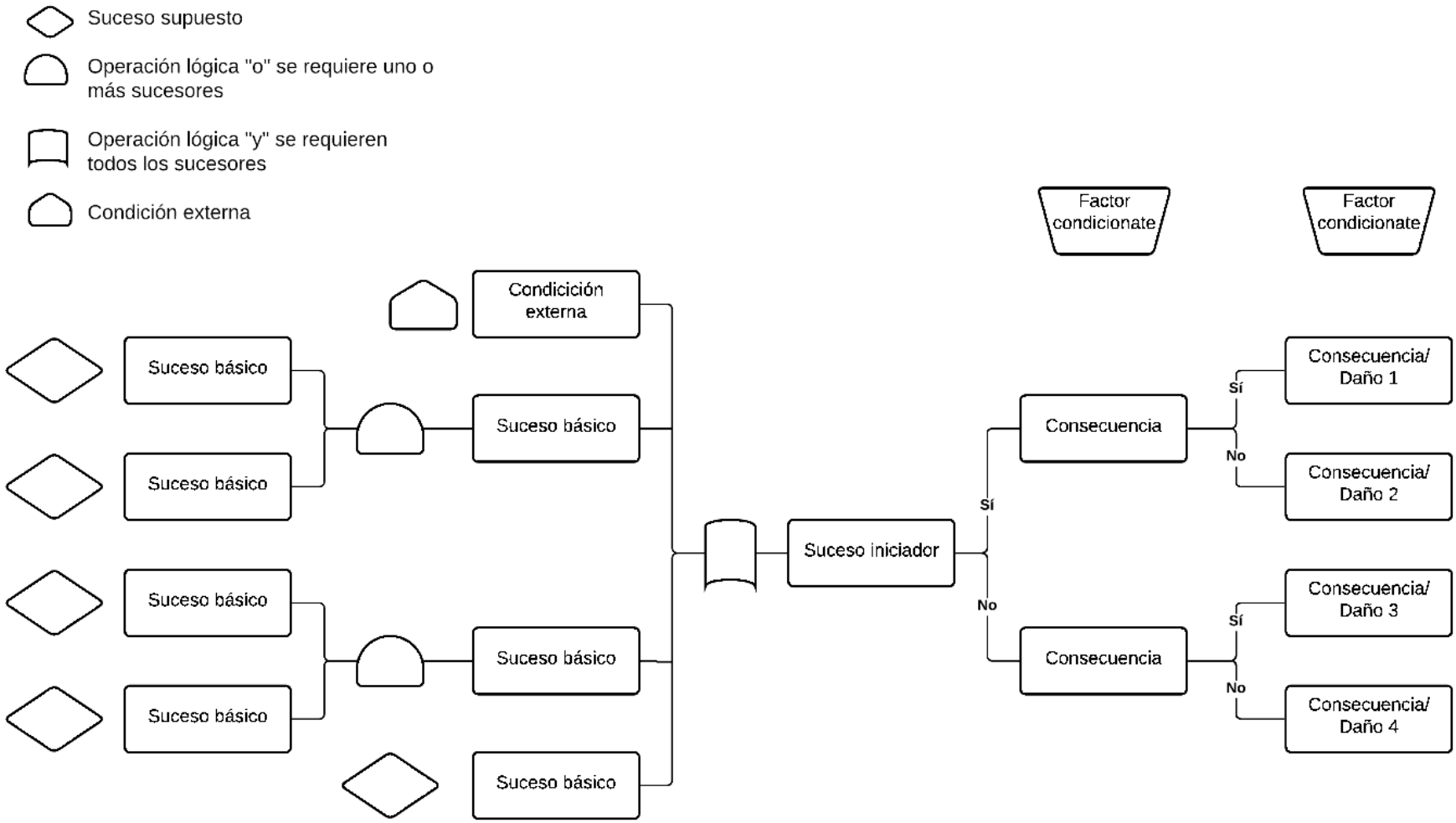


Figura 4. Esquema metodológico de análisis por árbol de fallo

Fuente: (Carretero, 2014)

2.1.2 Evaluación de los peligros identificados

La segunda etapa en la evaluación de riesgos ambientales es el análisis de los escenarios de riesgo para los peligros identificados en el escenario de exposición. Para esto se hace una estimación de la probabilidad o frecuencia de ocurrencia en función principalmente de la valoración de los sucesos iniciadores del escenario. Seguidamente se hace la estimación de la gravedad tomando como referencia los límites del entorno y la vulnerabilidad del medio, esto a partir de las consecuencias pasivas o activas. Finalmente, se determina el riesgo ambiental asociado a cada escenario de riesgo. Lo anterior se resume en el siguiente esquema:

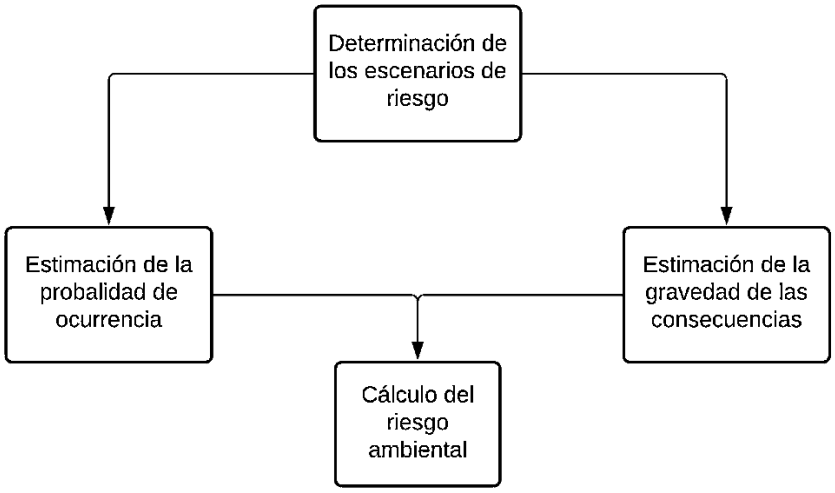


Figura 5. Metodología de análisis y evaluación de riesgos ambientales

2.1.3 Caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo corresponde a la asignación de categorías según los resultados de estimación de probabilidad y las consecuencias, entre las más comunes son de riesgo leve, moderado o significativo. Esto con el fin de que sea más sencilla su compresión, y pueda ser utilizado como una herramienta útil en la toma de decisiones. Aunado a esto, para una mejor interpretación se recomienda tener presente el escenario de riesgos planteado con anterioridad.

Los resultados generalmente se presentan en forma matricial, pues maximiza la representación de información, no obstante, para esto es importante utilizar una escala clara de pesos para

cada parámetro, esto es para la probabilidad y las consecuencias. Es de suma importancia que la evaluación se haga de forma imparcial, y no se apliquen juicios de valor. La adecuada compresión de los riesgos va a permitir tomar las acciones necesarias según sea el caso.

2.2 Cuenca como unidad de estudio

La cuenca, como unidad geofísica, se utilizó como delimitador de la zona de estudio debido a que sus propiedades físicas influyen en la cantidad de escorrentía generada y su desarrollo temporal, además que permite relacionar factores humanos y naturales que interactúen en el medio con los cuerpos de agua superficial. De modo que el análisis morfométrico de la cuenca, según, Gaspari (2012), permite conocer las características físicas de la cuenca, y a su vez la comparación entre las mismas además facilita la interpretación de la funcionalidad hidrológica y la definición de estrategias de manejo.

El estudio morfométrico comprende el análisis de parámetros generales de la cuenca, los que son asociados a su forma, asociados al relieve de esta, y los relativos al drenaje.

2.2.1 Parámetros morfométricos generales

Área

El área de la cuenca está definida como la proyección horizontal de la superficie de drenaje, en su totalidad, de un sistema de escorrentía dirigido de forma directa o indirecta a un mismo cauce natural. O bien, se puede entender también como la superficie delimitada por la línea divisoria de agua de la zona de estudio. Este es un valor importante para entender el comportamiento de la cuenca, y la respuesta de esta ante diversos factores externos, como lluvia o cambios en el uso de suelo (Lux, 2012).

Perímetro

El perímetro se define como la longitud medida sobre el plano horizontal que recorre la línea divisoria de aguas, es decir, el límite topográfico que indica donde las aguas cambiarán su dirección de escurrimiento, o sea que limita la superficie de captación.

Longitud axial de la cuenca

La longitud de la cuenca es la medida de la distancia horizontal existente desde la desembocadura de la cuenca hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal corresponde a la medida de la longitud del cuerpo de agua principal de la cuenca, este es el que le da nombre a la cuenca. Este valor es relevante para la consideración de la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua.

Ancho de la cuenca

El ancho de la cuenca se determina como la relación entre el área y la longitud de la cuenca, dado que la forma es muy variable.

Desnivel altitudinal

El desnivel altitudinal hace referencia al valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. Este factor es relevante para entender la respuesta de la cuenca, y el tipo de flujo que se espera en los cuerpos de agua de esta.

2.2.2 Parámetros morfométricos asociados al relieve

Curva hipsométrica

La curva hipsométrica es la representación de forma gráfica del relieve de la cuenca, de modo que relaciona el porcentaje de área acumulada con la respectiva cota. De este tipo de análisis puede extraerse características fisiográficas de las cuencas. Es posible su obtención a partir del modelo de elevación digital de la cuenca, complementado con la estimación de la superficie por cada cota (Serrano, 2017).

El análisis de la curva hipsométrica permite establecer un criterio para la comparación de una determinada cuenca con otros sistemas hidrográficos, con lo que se puede determinar la ubicación de la cuenca en el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en la que se encuentra. Esto se logra al establecer una relación entre las alturas parciales y la altura total, así como entre las áreas parciales definidas entre curvas de nivel y el área total de la cuenca.

La siguiente figura presenta el modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión propuesto por Senciales y Ferre.

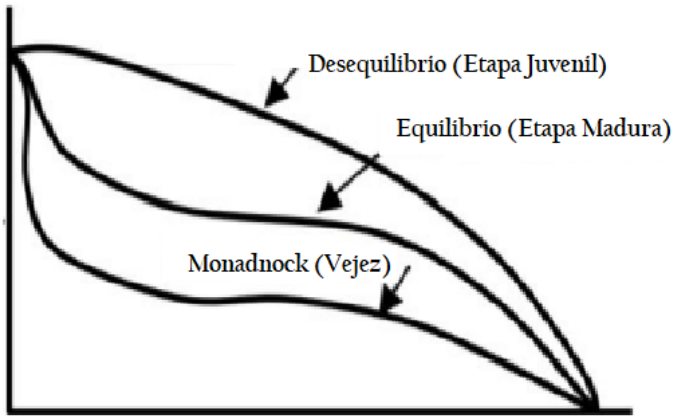


Figura 6. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión (Ferre, 1999)

Cota máxima y mínima

La cota máxima y mínima corresponden al nivel de máxima y mínima altitud, respectivamente.

Histograma de frecuencias de altitudes

El histograma de frecuencia de altitudes representa el grado de incidencia, de manera porcentual, de las áreas comprendidas entre las curvas de nivel, o bien, dentro de rangos preestablecidos, con respecto al área total de la cuenca. Lo cual permite tener un panorama más claro la distribución altitudinal de la cuenca (Gaspari, 2012). De los parámetros anteriores es posible extraer los siguientes indicadores:

- Altitud media: También conocida como elevación media es la altitud correspondiente al 50 % del área de la cuenca. Este parámetro se determina mediante el uso de la curva hipsométrica.
- Altitud más frecuente: Corresponde al valor de altitud con el mayor porcentaje de la curva de frecuencia de altitudes.

Pendiente media de la cuenca

Corresponde a uno de los principales factores para caracterizar el relieve, pues permite tener información de posibles fenómenos erosivos que se manifiesten en la superficie. A su vez, se espera que, entre mayor pendiente, corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y en los afluentes del cauce principal.

La pendiente media, hace referencia al cociente de entre la diferencia de elevación que existe entre la cota máxima y la desembocadura del cauce principal, sobre la mitad de la medida del perímetro, y se expresa de manera porcentual (Lux, 2012). La fórmula más conocida para su determinación es la siguiente:

$$S_{med} = 100\ \frac{(\sum Li)E}{A} \tag{1}$$

Donde:

P_{med} = Pendiente media (%)

$\sum L_i$ =Sumatoria de las longitudes de las curvas de nivel (km)

E = Equidistancia entre las curvas de nivel (km)

A = Superficie de la cuenca (km^2)

Pendiente del cauce principal

La pendiente del cauce principal es un parámetro significativo de considerar, pues el escurrimiento por las corrientes de agua depende de ello, de manera que entre mayor sea la pendiente mayor será la velocidad ligada a este valor (Serrano, 2017). Lo que a su vez se relaciona con el tiempo de retención hidráulica en el cauce, y por ende con la capacidad de autodepuración de este.

Uno de los métodos más empleados para el cálculo de la pendiente, es simplemente el cociente de la diferencia entre la mayor altitud del cauce y la menor, y la longitud del cauce principal, lo cual se representa de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{H_{máxc} - H_{mínc}}{L_{cp} * 1000} * 100$$

(2)

Donde:

S_C = Pendiente media del cauce principal (%)

$H_{máxc}$ = Altitud mayor del cauce (m)

$H_{mínc}$ = Altitud menor del cauce (m)

L_{CP} = Longitud del cauce principal (km)

2.2.3 Parámetros morfométricos asociados a la forma

Factor de forma de Horton

El factor de forma de Horton es la relación entre el ancho medio de cuenca y su longitud axial. Si se emplea la definición de que el ancho medio es el área de la cuenca dividida entre la longitud axial, el factor de Horton se puede representar de la siguiente forma:

$$k_f = \frac{A}{L^2}$$

(3)

Donde:

k_f= Factor de forma de Horton

A = Área de la cuenca (km^2)

L = Longitud axial (km)

El factor de forma se relaciona con la irregularidad de la cuenca, de manera que entre menor sea el factor más irregular es la cuenca y por ende se espera una respuesta más pasiva ante un cambio brusco en la escorrentía, mientras que un coeficiente más alto indica una respuesta más rápida, en una cuenca con la misma área.

Los factores geológicos son los principales encargados de moldear la fisiografía de una región, y por ende la forma de las cuencas hidrográficas, por lo que es de esperar similitudes entre

cuencas vecinas. Un factor de forma con un valor superior a 1, indica un alto grado de achatamiento o un río principal corto y por consecuencia a la tendencia de concentrar la escorrentía pluvial intensa, provocando crecidas, o bien en términos ambientales disminuyendo el tiempo de retención hidráulico y con ello la capacidad de autodepuración (Lux, 2012).

La siguiente Figura 7 presenta la relación que existe entre el caudal a la salida de la cuenca y el tiempo de concentración en esta.

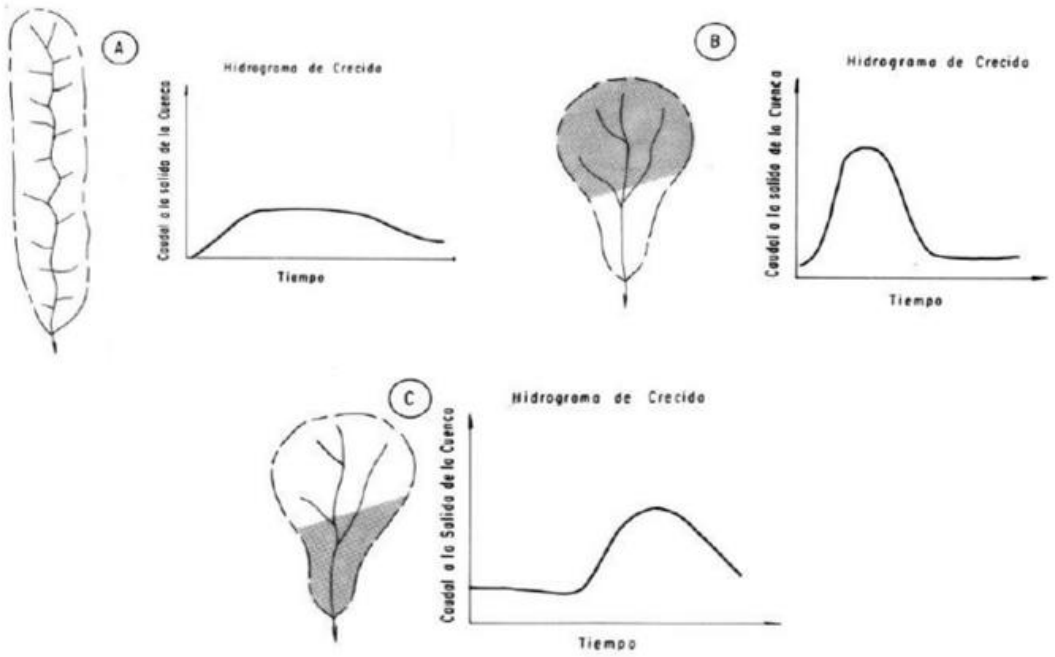


Figura 7. Relación entre la morfología de la cuenca y el caudal para eventos de precipitación
Fuente: (Ferre, 1999)

Coeficiente de compacidad

También conocido como índice de Gravelius, se define como la relación entre el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo con la misma área. Este es un coeficiente adimensional, cuyo valor nunca es menor a 1, y entre más cercano a 1 sea, indica la tendencia a concentrar volúmenes de agua de escurrimiento. El coeficiente está definido por la siguiente ecuación:

$$k_c = \frac{P}{Pc} = \frac{P}{2\pi R} = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4)$$

Donde:

k_C = Coeficiente de compacidad

P = Perímetro de la cuenca (km)

P_C = Perímetro de la circunferencia (km)

R = Radio de la circunferencia (km)

A = Área de la cuenca (km^2)

De acuerdo con el índice de Gravelius se han establecido 3 diferentes categorías de clasificación:

Cuadro 4. Formas de la cuenca de acuerdo con el índice de compacidad

Clase de forma	Índice de compacidad	Forma de la cuenca
Clase I	1,0 – 1,25	Casi redonda a oval - redonda
Clase II	1,26 – 1,50	Oval – Redonda a oval oblonga
Clase III	1,51- >2,0	Oval- oblonga a rectangular - oblonga

Fuente: (Lux, 2012)

Coeficiente de circularidad

El coeficiente de circularidad o de redondez, fue introducido en 1977, y similarmente relaciona el área de la cuenca con su longitud mediante la asimilación de la longitud al diámetro de un círculo asociado. Tal que, para una cuenca perfectamente circular, el coeficiente tendría un valor de 1, y a mayor elongación menor será el valor, pero siempre mayor a 0 (Jardí, 1984). El coeficiente de redondez se define con la siguiente expresión:

$$K = \frac{\pi L^2}{4\,A} = \frac{4\,\pi\,A}{P^2} \tag{5}$$

Donde:

K = Coeficiente de circularidad

A = Área de la cuenca (km^2)

L = Diámetro de la circunferencia asociada (km)

P = Perímetro de la cuenca (km)

2.2.4 Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

El sistema o red de drenaje de la cuenca se refiere al cauce principal y todos sus tributarios. La caracterización de la red permite una mejor interpretación de los patrones de escorrentía de la cuenca.

Orden de las corrientes de agua

El orden de las corrientes de agua es una clasificación que indica el grado de ramificación que tiene el sistema de cauces. A pesar de que existen distintas metodologías para realizar la clasificación, en el presente proyecto se utilizó el método de Horton, pues es uno de los más extendidos. El método se fundamenta en los siguientes criterios:

- Corrientes de primer orden: Corrientes portadoras de aguas de nacimiento y que no tienen tributarios.
- Corrientes de segundo orden: Unión de dos corrientes de primer orden.
- Corrientes de tercer orden: Unión de dos corrientes de segundo orden.

De forma general:

- Corrientes de orden n + 1: Unión de dos corrientes de orden n.

Con la aclaración de que cuando una corriente se une con otra de mayor orden, resulta una corriente que conserva el mayor orden.

La siguiente Figura 8 ejemplifica el procedimiento de clasificación por orden de corrientes.

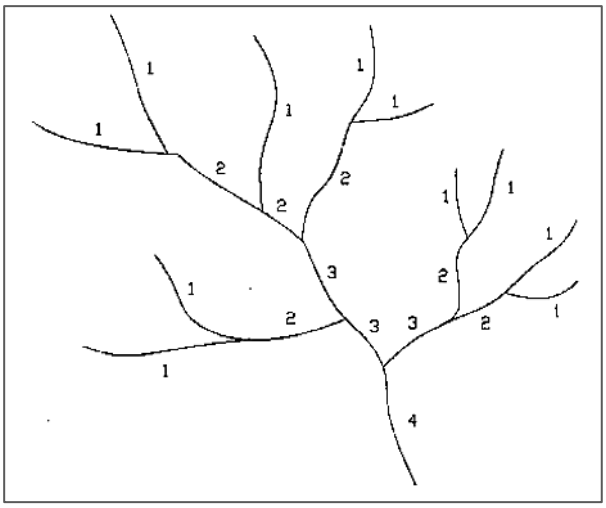


Figura 8. Número de orden de corrientes según Horton (Serrano, 2017)

El número de orden de corriente ayuda a establecer el tipo de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación, debido a que entre mayor el orden alcanzado más rápida sería la respuesta esperada.

Longitud total de drenaje

La longitud total de drenaje corresponde como su nombre lo indica, la medida total de las corrientes de agua de la cuenca.

Densidad de drenaje

La densidad de drenaje corresponde a la razón entre la longitud total de los cauces y el área total de la cuenca. De modo que permite interpretar la proporción de la cuenca que corresponde a corrientes de agua. La densidad de drenaje se expresa de la siguiente manera:

$$D_d = \frac{L_D}{A} \tag{6}$$

Donde:

D_d = Densidad de drenaje (km/km^2)

L_D = Longitud total de drenaje

A = Área total de la cuenca

Para este factor se define un rango de 0,5 km/km^2 para drenaje pobre a 3,5 km/km^2 para cuencas particularmente bien drenadas (Serrano, 2017).

Sinuosidad de las corrientes de agua

La sinuosidad de las corrientes de agua se presenta como la relación entre longitud del cauce principal, y la medida de este en línea recta, y se expresa de la siguiente manera:

$$S = \frac{L_{CP}}{LR} \tag{7}$$

Donde:

S = Sinuosidad de las corrientes de agua

L_{CP} = Longitud total del cauce principal (km)

LR = Media del cauce en línea recta

Este parámetro busca dar una idea de la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente, relacionado con los cambios de dirección que pueden darse en el cauce. Cuando la sinuosidad es de 1,25 o menor, se dice que es un río de alineamiento recto.

Tiempo de concentración

Se define como tiempo de concentración al tiempo que tarde una gota de agua de lluvia en llegar desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la desembocadura (Lux, 2012).

Según la ecuación propuesta por Giandotti, se determina de la siguiente manera:

$$t_C = \frac{(4\sqrt{A} + 1{,}5\ L_{CP})}{0{,}8\ \sqrt{H}} \tag{8}$$

Donde:

t_C = Tiempo de concentración (h)

A = Área de la cuenca (km^2)

L_{CP} = Longitud del cauce principal (km)

H_{MED} = Elevación media de cuenca (m)

Otra propuesta para la determinación del tiempo de concentración, con la variante de que agrega la pendiente de la cuenca en el cálculo, es la función de Kirpich, la cual está dada por la siguiente ecuación:

$$tc = 0{,}066 \left(\frac{L}{s_o}\right)^{0{,}77} \tag{9}$$

Donde:

t_C = Tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce principal (km)

S_o = Pendiente promedio del cauce principal (m/m)

2.3 Análisis multiespectral de imágenes satelitales

Las imágenes multiespectrales son captadas mediante sensores instalados en plataformas espaciales que transforman los niveles de radiancia procedentes de la superficie terrestre en valores numéricos que representan los diferentes rangos de longitud de onda específicos, a través del espectro electromagnético. Con el fin de obtener información interpretable de la tierra, estos valores son representados por medio de bandas espectrales, como las bandas visibles RGB, por las siglas en inglés de los colores *Red, Green, Blue* que hacen referencia a su respectiva banda, o bandas que no puede capturar el ojo humano, como el infrarrojo cercano (NIR), o el infrarrojo medio y térmico (Centro de Información Geográfica, 2004).

El proceso de obtención de las imágenes multiespectrales se conoce como teledetección o percepción remota, el cual se ha evolucionado aceleradamente en las últimas décadas con la llegada de la tecnología satelital, su origen se da con el inicio de las actividades aeronáuticas a inicios del siglo XX, para posteriormente dar un salto tecnológico con el desarrollo de actividades espaciales. La teledetección actualmente es muy utilizada en distintas aplicaciones, tales como: extracción de información, detección de cambios en el uso de suelo, agricultura

(rendimiento de cultivos), vulcanología, monitorización de desastres naturales, entre muchas otras (Berdugo, 2016).

También existe gran diversidad en los satélites en función de factores como su resolución espacial, el número de regiones espectrales o bandas que registran, periodicidad de recolección, y otros. En lo que refiere a la resolución espacial, esta depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética, el detalle espacial de captura, además del número y ancho de las bandas que contenga. Entre los satélites más conocidos son el *Advanced very high resolution radiometer* (AVHRR, siglas en inglés), el *Moderate resolution imaging spectrometer* (MODIS, siglas en inglés) especial para el monitoreo en gran escala de la biosfera, la serie Landsat y SPOT, adecuados para trabajos de gran nivel a mayor detalle.

2.3.1 Satélite Landsat

Específicamente, los satélites Landsat son un proyecto del gobierno de Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA, siglas en inglés), es la encargada del mantenimiento y operación del proyecto, por otro lado, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, siglas en inglés) se encarga de la producción y comercialización de las imágenes resultantes. En total el proyecto ha lanzado 8 satélites, actualmente solo 2 se encuentran activos y existen planes para poner en órbita el Landsat 9 en el 2021. El siguiente Cuadro 5 presenta un resumen del año de lanzamiento y de salida de cada satélite.

Cuadro 5. Fecha de lanzamiento y retiro de los satélites Landsat

Satélite	Fecha de lanzamiento	Fecha de retiro
Landsat 1	23 de julio de 1972	6 de enero de 1978
Landsat 2	22 de enero de 1975	25 de enero de 1982
Landsat 3	05 de marzo de 1978	31 de marzo de 1983
Landsat 4	16 de junio de 1982	14 de diciembre de 1993
Landsat 5	07 de marzo de 1984	05 de junio de 2013
Landsat 6	03 de octubre de 1993	Lanzamiento fallido
Landsat 7	15 de abril de 1999	Actualidad
Landsat 8	11 de febrero de 2013	Actualidad
Landsat 9	Próximamente (2021)	-

Fuente: (Geomatica, 2019)

Los tres primeros satélites (Landsat 1, 2 y 3) utilizaron una longitud de onda desde 0,50 µm a 1,10 µm, y contaba con el sensor de Sistema de Escáner Multiespectral (MSS, siglas en inglés), además contaban con una resolución espacial de 60 m. Estos satélites fueron empleados para obtener información sobre recursos hídricos, geografía, cartografía, contaminación ambiental, oceanografía, recursos marinos y fenómenos meteorológicos. Seguidamente, para los satélites 4 y 5 se amplió su longitud de onda de 0,50 µm a 2,35 µm, y contaba con los sensores MSS y el Mapeado Temático (TM, siglas en inglés), lo que permitió extender su aplicación a campos como la detección de campos globales, agricultura, calidad de agua y administración de recursos (Geomatica, 2019).

Posteriormente, el satélite Landsat 7 utiliza una longitud de onda de 0,45 µm a 12,50 µm y las imágenes constan de 8 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de las bandas 1 a la 5 y la 7, mientras que la banda 8 es pancromática, de manera que la resolución espacial es de 15 m. Este satélite está equipado con el sensor Mapeado Temático Mejorado Plus (ETM+) que lo hace un instrumento más versátil para el estudio de cambios climáticos, monitoreo de la superficie terrestre y cartografía de grandes áreas (González, 2018).

En el siguiente Cuadro 6 se presentan las características de las 8 bandas de la imagen tomada por el satélite Landsat 7.

Cuadro 6. Características espectrales de la imagen de Landsat 7 ETM+

Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución radiométrica
1 - Azul	ETM+	0.45 - 0.52	30	8 bits
2 - Verde	ETM+	0.52 - 0.60	30	8 bits
3 - Rojo	ETM+	0.63 - 0.69	30	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	ETM+	0.76 - 0.90	30	8 bits
5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	ETM+	1.55 - 1.75	30	8 bits
6_1 – Termal – Baja ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 *(30)	8 bits
6_2 – Termal – Alta ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 *(30)	8 bits
7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	ETM+	2.08 - 2.35	30	8 bits
8 - Pancromática	ETM+	0.52 - 0.90	15	8 bits

**Las Bandas tienen una resolución de 60 metros, pero el producto final procesado es de 30* metros.

Fuente: (Geomatica, 2019)

La resolución temporal del Landsat 7 ETM+ es de 16 días, y su tamaño aproximado es de 170 km de Norte a Sur y 183 km de este a oeste. En el año 2002 el sensor presentó una falla que hace que las imágenes se generen con brechas en forma de líneas paralelas en diagonal, este error en las imágenes se denomina *Scan Line Corrector* (SLC, siglas en inglés). Las imágenes con SLC tienen una pérdida de datos de al menos 22 %, el grosor de cada brecha oscila entre un píxel (30 metros) hasta más de 15 píxeles (450 metros). De manera que, dependiendo de la ubicación de la falla en la imagen, la afectación puede ser considerable, principalmente en tareas de muestreo y clasificación (González, 2018).

En la siguiente Figura 9 se muestra un ejemplo del efecto del SLC en la calidad de las imágenes.

Figura 9. Ejemplo de imagen Landsat sin SLC (izq.) y con SLC (der.)
Fuente: (González, 2018)

Actualmente existen diferentes algoritmos que reparan las imágenes, no obstante, los más comunes o de más fácil acceso presentan algunas limitaciones como:

- Falta de calidad en la imagen corregida, pues es la mayoría de los casos no se logra corregir de forma óptima la brecha, y quedan zonas borrosas dentro de la imagen, lo cual se agrava si hay presencia de nubes y sombras.
- No todos los algoritmos desarrollados son de libre acceso, o se desarrollan en entornos de paga, lo que reduce su uso y distribución.
- Necesidad de utilizar imágenes auxiliares en la mayoría de los algoritmos, la cual es una imagen similar a la que presenta el SLC, pero en un espacio físico y temporal distinto.
- Excesivo tiempo de reparación, debido a que consumen mucha memoria por el gran número de comparaciones necesarias.

Por último, el Landsat 8 es un satélite óptico de resolución media, el cual utiliza una longitud de onda de 0,43 µm a 12,51 µm y las imágenes cuentan con 11 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de las bandas 1 a la 7 y la 9, la banda 8 que es pancromática,

además de las 10 y 11 que corresponden a bandas térmicas de resolución de 100 metros pero que pueden ser procesadas a 30 metros. Este satélite tiene una resolución espacial de 16 días, y su lanzamiento procuraba ampliar sus aplicaciones a áreas como educación, negocios y el ámbito estatal.

Este satélite tiene dos sensores: el Sensor Operacional de Imágenes de Tierra (OLI, siglas en inglés), el cual tiene 9 bandas espectrales que le permiten ir desde lo visible hasta el espectro de radiación bajo ondas y el Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS, siglas en inglés), compuesto por dos bandas espectrales específicas para infrarrojos térmicos, imprescindible para medir la temperatura de la Tierra (Geomatica, 2019). Sin embargo, en comparación con el Landsat 7 ETM+, las imágenes de banda térmica se consideran de resolución inferior pues son de 100 metros, mientras que las anteriores eran de 60 metros.

En el siguiente cuadro se muestran las características de las bandas de las imágenes tomadas por el Landsat 8.

Cuadro 7. Características espectrales de la imagen de Landsat 8

Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)	Resolución Radiométrica
1 - Ultra azul (costero / aerosol)	OLI	0.43 - 0.45	30	16 bits
2 - Azul	OLI	0.45 - 0.51	30	16 bits
3 - Verde	OLI	0.53 - 0.59	30	16 bits
4 - Rojo	OLI	0.64 - 0.67	30	16 bits
5 - Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0.85 - 0.88	30	16 bits
6 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	OLI	1.57 - 1.65	30	16 bits
7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	OLI	2.11 - 2.29	30	16 bits
8 - Pancromática	OLI	0.52 - 0.90	15	16 bits
9 - Cirrus	OLI	1.36 - 1.38	30	16 bits
10 - Infrarrojo térmico 1	TIRS	10.60 - 11.19	100 *(30)	16 bits
11 - Infrarrojo térmico 2	TIRS	11.50 - 12.51	100 *(30)	16 bits

*Las Bandas tienen una resolución de 100 metros, pero el producto final procesado es de 30 metros.

Fuente: (Geomatica, 2019)

2.3.2 Clasificación de imágenes satelitales

Las técnicas de clasificación de imágenes posibilitan la extracción de información, tal que sea posible presentarla en datos temáticos o mapas que muestran un significado evidente, esto mediante comparar y relacionar las clases espectrales de las categorías de interés con los valores digitales de cada píxel. Se han desarrollado un gran número de técnicas para este fin, no obstante, se pueden clasificar en dos grupos concretos:

Clasificación no supervisada

La clasificación no supervisada está relacionada con el valor relativo al color, al tono, o bien, al clúster, para identificar entidades. De manera que, en el proceso se agrupan los píxeles con valores digitales similares, en el que se espera que estas correspondan a un tipo específico de terreno. El proceso es realizado por un algoritmo automatizado, y no se tiene la influencia de ningún factor externo.

Clasificación supervisada

La clasificación supervisada corresponde al proceso en el que se establecen áreas de entrenamiento, utilizando los píxeles de identidad conocida que corresponden a las áreas de cubierta terrestre de interés, para posteriormente con esta información clasificar píxeles desconocidos. En este proceso es de suma importancia que el analista conozca la zona de interés y se verifique con mapas y fotografías áreas. En el proceso final de adjudicación de cada uno de los píxeles de la escena a alguna clase, existen diversos algoritmos para esta función, entre los más sobresalientes están (Teledet, 2018):

- Clasificador por mínima distancia: Este algoritmo basa la clasificación en el valor de la media de los datos de entrenamiento de las clases seleccionadas. La principal limitación que se da para este tipo de clasificador es la reducida sensibilidad a los diferentes grados de varianza en las respuestas espectrales de las clases.
- Clasificador por paralelepípedos: Este clasificador se implementa al definir un subespacio en forma de paralelepípedo para cada clase, donde los límites son definidos por el rango de valores para cada área de. No obstante, este algoritmo presenta errores, principalmente asociados al relativamente frecuente solapamiento de las clases.

- Clasificador por máxima probabilidad: Este clasificador corresponde a un algoritmo paramétrico, o sea que asume una distribución estadística particular para las clases consideradas. Para implementar el modelo se requieren parámetros como la media y la matriz de covarianza de las áreas de entrenamiento.

Preparación de la imagen satelital

Además de determinar el tipo de clasificación a utilizar, en el caso de las imágenes obtenidas de los satélites Landsat, se debe realizar un procesamiento previo para mejorar la calidad de los resultados. El primero es *Pan-sharpening*, que es un proceso en el que se fusiona una imagen multiespectral pancromática de alta resolución con otra en cualquier otra banda espectral, pero con menor resolución, para crear una sola imagen en color de alta resolución.

En la siguiente Figura 10 se presenta un esquema del proceso realizado.

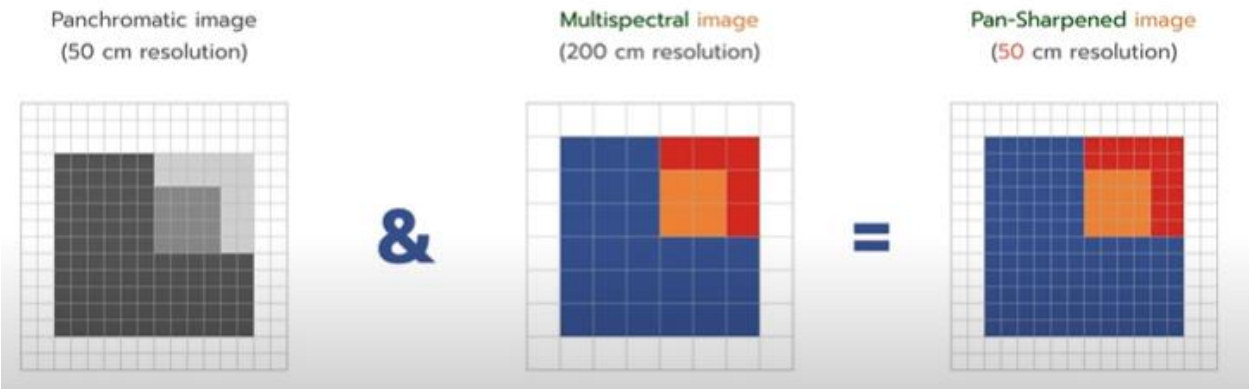


Figura 10. Ejemplo de procedimiento *Pan-sharpening*

Fuente: (GIS4DEV, 2019)

El procedimiento de *Pan-sharpening* se puede aplicar en las imágenes del Landsat 7 ETM+ y del Landsat 8, que cuentan con la banda pancromática 8 como se puede observar en el Cuadro 6 y el Cuadro 7. Es así como en ambos casos es posible obtener imágenes con resolución de 15 metros para las bandas espectrales en el campo visible.

El segundo es la corrección atmosférica, el cual es un procedimiento que se aplica a imágenes digitales con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que percibe el sensor producto de la interacción con la atmósfera, y que posteriormente se ve

reflejado en la imagen. Asimismo, pretende eliminar el componente intrusivo de la atmósfera (Aguilar & Mora, 2014).

2.4 El agua de cuerpos superficiales

La calidad del agua de los cuerpos de agua superficiales está relacionada a diferentes aspectos, tales como la cobertura del entorno, aspectos socioambientales, la cantidad de agua disponible, entre otros.

2.4.1 Ciclo hidrológico

Es importante reconocer el recorrido del agua en el ciclo hidrológico, pues, aunque es un tema ampliamente desarrollado, es de suma importancia su abordaje desde la perspectiva de la calidad del agua. En la siguiente Figura 11 se pueden observar los principales procesos que ocurren.

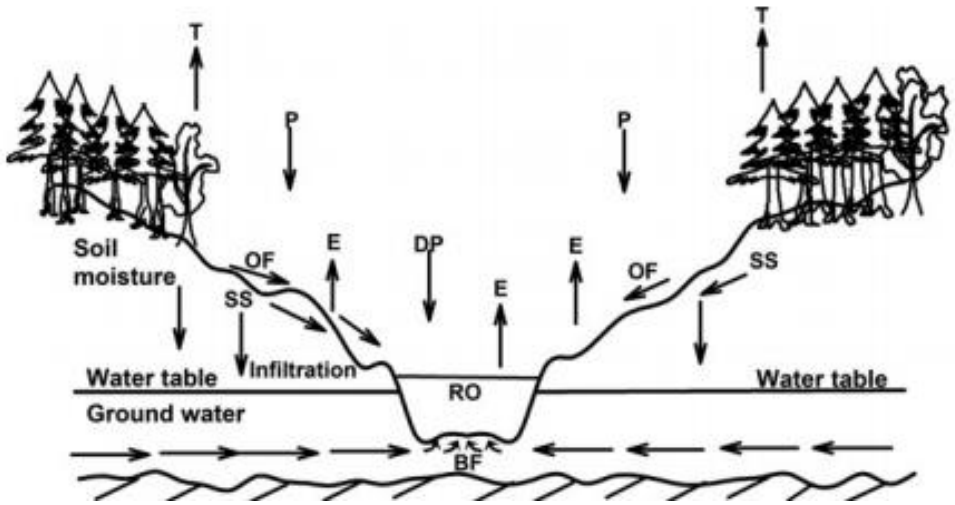


Figura 11. Ciclo hidrológico

Fuente: (Boyd, 2020)

Como se observa en la anterior figura, el agua regresa a la atmosfera por la evaporación en los cuerpos de agua y del suelo húmedo (E), además de la transpiración de las plantas (T), la combinación de estos dos procesos se conoce como evapotranspiración (ET). El vapor de agua es capturado en la circulación atmosférica y lo traslada de puntos de mayor a menor presión atmosférica, esto da como resultado la condensación del vapor de agua y la formación de

nubes que favorece las precipitaciones en lluvia, granizo o nieve, lo cual puede ser de manera indirecta (P), o de forma directa a la corriente de agua (DP).

El agua precipitada eventualmente se evapora en su caída por la atmosfera, o es interceptada por la vegetación o demás elementos hechos por hombres, y finalmente se evapora, también poder ser dirigida directamente a la corriente de agua por sistema de drenaje pluvial o por su curso natural sobre la superficie (OF), o se acumula en el suelo y se infiltra en la superficie del suelo (SS). El agua infiltrada puede que sea retenida en el suelo (humedad del suelo), o bien, continúa su camino hasta que alcance una capa de suelo impermeable y es retenida por una formación geológica, llamado acuífero, el agua subterránea eventualmente se filtrará a arroyos, lagos o el océano, o puede ser removida mediante pozos para uso humano (Boyd, 2020).

Las cuencas hidrográficas funcionan como unidad de gestión del recurso hídrico, pues es un delimitante geográfico de un curso de agua que vierte en un punto determinado, de manera que permite relacionar los parámetros intervinientes en el ciclo hidrológico, tal que la escorrentía superficial (RO) es igual la precipitación directa (DP) más el flujo superficial (OF), subterráneo y el flujo base (BF), menos la cantidad de precipitación que ha sido evapotranspirada (ET). De manera que, la superficie de la cuenca interfiere activamente en la respuesta hidrológica ante un evento de precipitación, tanto en la cantidad de agua y el tiempo de retención hidráulica estimado como en la calidad de agua.

Las cuencas hidrográficas se pueden clasificar en rurales y urbanas, dependiendo del uso de suelo, es así como la diferencia entre una y otra es el resultado de la continua alteración debida al efecto de los procesos de urbanización sobre el medio natural. El proceso de urbanización impacta directamente en el ciclo hidrológico (Espín, 2016).

Impacto sobre la distribución del agua

El principal efecto de la urbanización en términos de distribución del agua se da en el cambio de la escorrentía superficial, pues se modifica la superficie de la cuenca y las vías de escurrimiento natural. De manera que, el aumento de las superficies impermeables conlleva a una disminución de las áreas de infiltración, y la precipitación que anteriormente era interceptada por la vegetación o almacena como infiltración en el suelo ahora se convierte en escurrimiento superficial, lo que a su vez hace que disminuya la percolación e infiltración, así como el escurrimiento subsuperficial y subterráneo.

Por otra parte, la infraestructura propia de las urbes, tales como caminos, parqueos, comercios, entre otros, tienen una menor resistencia al flujo que la cobertura vegetal, lo que aumenta la velocidad de flujo superficial, aunado a las propias redes de drenaje pluvial convencional, lo que conlleva indudablemente a una disminución del tiempo de concentración en la cuenca. La siguiente Figura 12 presenta como se relaciona la cobertura del suelo con el hidrograma esperado de la cuenca.

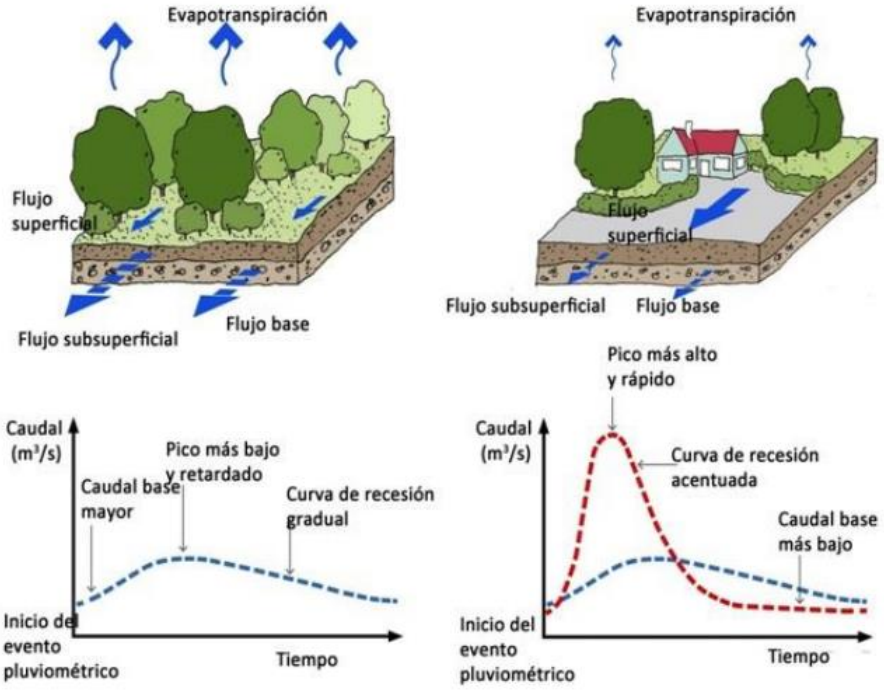


Figura 12. Efectos de la urbanización en la respuesta de una cuenca hidrográfica a la precipitación
Fuente: (Espín, 2016)

Como se puede observar de la figura anterior, en la cuenca con suelo más impermeabilizado es de esperar un caudal pico mayor y más rápido, dado el evento de precipitación, por lo que este tipo de cuenca también es más propensa a las inundaciones. Aunado a esto, como hay menos percolación e infiltración es menor el flujo subsuperficial y, por ende, el flujo base.

Impacto sobre la calidad del agua

El impacto de la urbanización sobre la calidad del agua puede ser de forma directa o indirecta, dependiendo de la forma en la que llegue el contaminante al cuerpo de agua. Un ejemplo de impacto negativo directo es: según la Encuesta Nacional de Hogares para Costa Rica en el

2016, cerca de un 5 % de la población rural del país no utiliza algún sistema de tratamiento para sus aguas residuales, o no tiene infraestructura propia para la disposición de excretas, de modo que en muchos de estos casos el agua residual es conectada directamente a los cuerpos de agua superficial (Mora & Portuguez, 2017).

Mientras que, de manera indirecta un ejemplo es la disposición de residuos sólidos generados por la actividad humana sobre la superficie de la cuenca, de modo que son arrastrados por la escorrentía superficial hacia las masas de agua receptoras, además dada la baja resistencia al flujo, tiene mayor capacidad de arrastre durante los eventos de precipitación y escorrentía. Esto no solo ocurre con residuos sólidos, sino que también se sucede con contaminantes líquidos o en partículas, que igualmente son arrastrados a la corriente de agua, como por ejemplo los emitidos por los vehículos.

El efecto en las cuencas depende en gran medida de los controles socioambientales que se den por los gobiernos locales, y las entidades correspondientes. Las consecuencias más comúnmente asociadas al desarrollo de las urbes está el aumento de la carga de contaminantes, generación de malos olores, la variación de la temperatura del agua y efectos negativos sobre la biodiversidad y la salud humana (Espín, 2016).

Impacto sobre la geomorfología

La geomorfología es uno de los aspectos que la urbanización cambia, tanto de los cauces como de la superficie de la cuenca. Algunos de los impactos que más fácilmente son observados son:

- Socavaciones en el lecho, así como la modificación de la sección transversal de las zonas de vertido asociado a la erosión por el incremento del caudal y el efecto del caudal pico.
- Cambios en la sección debido a alteraciones en el proceso de sedimentación y erosión.
- Cambios en las pendientes de la superficie que pueden afectar la escorrentía superficial.

Los cambios en la geomorfología de los cauces provocan a su vez la alteración del ecosistema, donde el aumento de los caudales y el eventual aumento de la erosión pueden incentivar el desplazamiento de comunidades biológicas que disfruten de las riberas de los ríos. Asimismo, el arrastre de partículas contaminantes puede afectar gravemente a la vida acuática, e incluso

pueden verse perjudicadas por cambios en los niveles de oxígenos disponibles en el agua, lo que conlleva a un cambio sistemático de la población acuática endémica (Espín, 2016).

2.4.2 Calidad del agua

Los estándares relacionados a la calidad del agua han sido desarrollados con el objetivo de definir los posibles usos que se le puedan dar al agua sin riesgo, así como para proteger los cuerpos de agua de la contaminación, y poder mantener un control en el tiempo. Por ejemplo, existen diferentes estándares para el agua de consumo humano, uso recreacional, industria, irrigación o cuidado de animales, o bien, la calidad del agua requerida para mantener una vida acuática sostenible y saludable, entre otros. Mantener el equilibrio de la calidad del agua, es la llave para el suministro de agua sostenible.

Cualquier parámetro físico, químico o biológico que sea medido al agua se puede considerar un parámetro de calidad del agua, no obstante, existen algunos que ya han sido definidos y estandarizados por su influencia y pertinencia en la determinación de grados de contaminación (Boyd, 2020). Seguidamente, se presentan los parámetros a considerar en el presente estudio:

Temperatura del agua

La temperatura es la medida del contenido de calor de un objeto producto de la cantidad de energía contenida. La principal fuente de energía calórica en los ecosistemas es la radiación solar, de modo la temperatura del agua puede variar de forma diaria, y también estacional. Por lo cual, es relevante la consideración de la estratificación termal del agua, en función de la profundidad, esto también afecta la actividad de los organismos acuáticos, lo que puede resultar en fluctuaciones en la calidad del agua. En los cuerpos de agua superficiales, la temperatura se ve afectada por diferentes factores, como el área de drenaje, la porción del flujo que realmente fluye, la velocidad de la corriente, la pendiente, la turbulencia del cauce, la precipitación y la cobertura forestal, aunque en cauces pequeños o de poca profundidad es de esperar una buena correlación entre la temperatura ambiental y la del agua.

Los aspectos físicos, químicos y biológicos de la calidad del agua están interrelacionados con la temperatura, está influye procesos variables o procesos como la velocidad de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuesto y formación de depósitos, aunado a esto, cuando se presentan altas temperaturas se potencia la proliferación de

microorganismos y puede aumentar los problemas de sabor, olor, color y corrosión (Boyd, 2020).

Sólidos totales disueltos (STD o TDS, siglas en inglés)

La concentración de sólidos totales disueltos (STD) se determina como los sólidos retenidos y secados (evaporizando el agua remanente en el filtro), al hacer pasar el agua por un filtro de 2-µm. La concentración esperada en agua natural es de 20 mg/L a los 1000 mg/L, y los sólidos generalmente son bicarbonato y carbonatos en pH superiores a 8,3, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, potasio, sodio y silicatos, lo cual depende directamente de la geología y los factores climáticos de la zona.

En zonas con alta precipitación y suelos lixiviados o poco desarrollados, se espera encontrar el agua menos mineralizada, mientras que el agua más mineralizada se espera en regiones áridas. Valores muy altos de STD pueden hacer el agua insostenible para uso doméstico, irrigación, y otros propósitos. Por otra parte, en agua salada es de esperar valores de STD cercanos a los 35 000 mg/L, y la vida acuática marina está adaptada a rangos de este tipo de STD (Boyd, 2020).

Salinidad

La salinidad usualmente se define como la concentración de sales disueltas (g/L), aunque la definición científica se ha modificado, no obstante, se considera que la definición común es suficiente para la mayoría de los propósitos en la evaluación de calidad del agua. La salinidad es comúnmente utilizada para evaluar la cantidad de iones presentes en el agua salada (Boyd, 2020).

La salinidad es relevante en estudios de aguas marinas, o en aguas superficiales donde puede haber infiltración de agua de mar. Valores muy altos de salinidad indican que el agua no puede ser aprovechable para consumo humano, uso doméstico, irrigación, entre otros. Se considera un indicador de presencia de sales la salinidad en un rango de 12-38 mg/L, mientras que el agua de mar sin dilución se espera un valor cercano a los 35 000 mg/L (Enviromental Protection Agency , 2001).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es un parámetro físico que hace referencia a la capacidad del agua de transmitir la corriente eléctrica, debido a que esta propiedad está relacionada con el contenido iónico de la muestra, de modo que también es un excelente indicador de la mineralización del agua (Boyd, 2020).

Asimismo, la conductividad es un indicador del rango esperado de la alcalinidad y dureza de la muestra, así como de la cantidad de sólidos disueltos totales, de manera que para agua superficial en la mayoría de los casos se puede aproximar que el valor de la conductividad representa dos terceras partes de los sólidos totales disueltos. Aunado a esto, es importante señalar que la conductividad está interrelacionada con la temperatura tal que se espera un aumento de aproximadamente 2 % en la conductividad por cada aumento de grado Celsius. Según estándares internacionales, en aguas superficiales se espera valores cercanos a los 1000-µS/cm (Enviromental Protection Agency , 2001).

pH

El pH (potencial Hidrogeno) se define como el negativo del logaritmo de la concentración del ion hidrógeno de una solución, lo que permite expresar en una escala numérica el grado de acidez, alcalinidad, o si es una sustancia neutral. En cuerpos de agua en estado natural se puede encontrar pH desde un valor de cercano a 4,5 para aguas ácidas, generalmente de aguas altas, hasta valores sobre 10,0, en aguas donde hay intensa actividad fotosintética provocada por algas, sin embargo, el rango más común para el agua natural es entre 6,5 a 8,0. Por otro lado, la vida acuática se puede desarrollar en un rango de 5,0 a 9,0, aunque es de preferencia que sea entre 6,5 a 8,5 (Enviromental Protection Agency , 2001)

La presencia de piedra caliza, silicatos de calcio y feldespatos en el suelo, u otras formaciones geológicas disueltas debido a la acción del dióxido de carbono pueden aumentar la concentración de bicarbonatos en el agua, y como consecuencia aumentar el pH del agua. El pH es uno de los parámetros más significativos en la determinación de la calidad del agua, debido a que el agua natural tiene tanto ácidos como bases, y los procesos biológicos tienen a modificar tanto la acidez como la basicidad (Boyd, 2020).

Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto (OD) es uno de los parámetros más importantes en la definición de la calidad del agua, debido a que es esencial para la respiración aeróbica de la vida acuática, de modo que entre mayor sea su cantidad, mejor es la calidad del agua, ya que el oxígeno es el encargado de degradar la materia orgánica que está presente en el agua. En un cuerpo de agua se produce y a la vez se consume OD. La producción de oxígeno está relacionada con la fotosíntesis, mientras el consumo dependerá de la respiración, descomposición de sustancias orgánicas y otras reacciones químicas (Vidal, 2017).

El oxígeno disuelto, así como cualquier otro gas disuelto en el agua, disminuye con el aumento de la elevación (menor presión barométrica), mayor salinidad y aumento de la temperatura. Por lo que, es de esperar que en la época seca se dé una disminución del OD en los cuerpos de agua, que es el momento cuando pueden enfrentarse mayor problemática relacionada al suministro de agua y la contaminación ambiental. Aunado a esto, la eutrofización está estrechamente ligada con la concentración de OD y la temperatura, pues cuando hay grandes concentraciones de fitoplancton, la fotosíntesis se extenderá por el periodo de permanencia de la luz diurna, produciendo mayor OD, el problema se da en la noche cuando se mantenga el consumo de oxígeno por parte de las plantas pero cese la fotosíntesis, lo que producirá un comportamiento sinusoidal en la concentración del oxígeno, en donde la amplitud del valle puede ser tal que afecta la vida acuática (Enviromental Protection Agency , 2001).

Según estándares internacionales presentados por la *Enviromental Protection Agency* (EPA, siglas en inglés), para una saturación del 100 % a 20° C y con una presión atmosférica de 760 mmHg, la concentración de oxígeno disuelto será de 8,5 mg/L, y desde ese punto solo va a disminuir con el aumento de la temperatura. Asimismo, este organismo recomienda para mantener la vida acuática una concentración mínima de 5 mg/L a un 100 o una concentración mayor al 100 % (Enviromental Protection Agency , 2001).

Demando Bioquímica de Oxígeno

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) corresponde al oxígeno disuelto que consume las bacterias para degradar la materia oxidable en la muestra. Su importancia radica en que, cuando desechos de tipo orgánicos son descargados en los cuerpos de agua, estos funcionan como una fuente de alimentación para las bacterias presentes, y la materia será degrada a

compuestos más sencillos como dióxido de carbono y agua. En el supuesto de que, al momento que se da el vertido, el cuerpo de agua no está contaminado y tiene niveles de OD normales, el proceso de degradación será aeróbico, de modo que las bacterias se podrán reproducir libremente, y con ello aumentará el consumo de OD.

Si la cantidad de contaminante es lo suficientemente grande, la tasa de absorción bacteriana superará al OD que repone la atmosfera más el que es producto de la fotosíntesis, finalmente el cuerpo de agua receptor pasará a un proceso de anaeróbico. Debido a esto, los subproductos de la degradación ahora serán más ofensivos, por ejemplo, sulfuro de oxígeno. Aún en el caso que el cuerpo receptor no se pase a un proceso anaeróbico, la disminución en la cantidad de OD disponible puede ser realmente perjudicial para la vida acuática, incluso obligando a las especies a emigrar o morir por falta de oxígeno. Por ejemplo, los peces de agua dulce pueden verse afectados de por vida si el nivel de OD está regularmente por debajo del 30 % de saturación.

Dado el peligro potencial que representa la disminución de OD, es importante la estimación de la demanda de oxígeno requerida para la degradación de la materia. El proceso de degradación puede tomar muchos días, no obstante, el proceso de determinación de DBO se estandarizó para hacer la medición en laboratorio a la muestra con 5 días de incubación a 20 °C y en la oscuridad, cuando se trata de esta medición el valor se presenta como $DBO_{(5,20)}$. La EPA sugiere para aguas superficiales valores indicativos de indicios de contaminación 5 mg/L de $DBO_{(5,20)}$, y para mantener la vida acuática saludable valores menor o iguales a 3 mg/L de $DBO_{(5,20)}$ (Enviromental Protection Agency , 2001).

Demanda Química de Oxígeno

La demanda Química de Oxígeno (DQO) corresponde al oxígeno disuelto consumido por las bacterias en el proceso de degradación completa de la materia orgánica. Como se mencionó en el apartado anterior la determinación del DBO está estandarizado a incubación de 5 días, no obstante, la degradación completa se estima que sucede en cerca de 5 veces esa cantidad de tiempo, de modo que a los 5 días se ha degradado aproximadamente el 65 % de la materia orgánica, por lo que el cálculo del DQO se presenta como una metodología química que permite obtener el resultado de la demanda de oxígeno debido degradación completa casi inmediata.

Dada la metodología, un aspecto importante a considerar es que los únicos compuestos afectados serán los que sean susceptibles al agente químico utilizado para la oxidación, dado que existe una gran variedad de agentes químicos oxidantes, habrá un amplio rango de efectos. El procedimiento estandarizado para la determinación de DQO conlleva el uso de reactivos adicionales que participan como catalizadores del proceso de oxidación de la materia orgánica, y además suprimen la interferencia de sustancias como cloruros, y como resultado se logra una oxidación cerca del nivel máximo.

Debido a que el DQO es en teoría la descomposición completa, se espera que la razón DQO/DBO sea de 100:65, esto es de 1,54:1, esta proporción se cumple para la mayoría de las aguas residuales domésticas. Según el Reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficiales, se recomienda para que el cuerpo de agua superficial sea una fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuática un valor máximo de 20 mg/L, mientras que para el desarrollo de actividades recreativas de contacto primario un valor máximo de 25 mg/L (Gobierno de Costa Rica , 2007).

Turbiedad

La turbiedad en el agua hace referencia a la reducción de su transparencia ocasionada por el material articulado en suspensión dada su naturaleza coloidal, y puede consistir en arcillas, limos, plancton o material orgánico finamente dividido, que no son filtrables por métodos ordinarios. La principal afectación que produce la turbiedad es en términos de aceptación por el consumidor, aunque también puede afectar la utilidad en la industria. Asimismo, puede afectar los procesos de desinfección, debido a que la turbiedad puede ser ocasionada por materias de agua residual, existe el riesgo que los organismos patógenos se escuden en las partículas que producen la turbiedad y puedan escaparse de la acción de los desinfectantes utilizados en el tratamiento (Enviromental Protection Agency , 2001).

El Reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficiales, establece que para el agua de utilizada en actividades recreativas de contacto primario se debe mantener un valor máximo de 25 mg/L (Gobierno de Costa Rica , 2007).

Color

El color natural del agua es el resultado de los rayos de luz solar que no han sido absorbidos luego de que haber atravesado el agua. Este refleja la presencia de moléculas orgánicas

complejas derivadas de la materia vegetal, tales como la arcillas, hojas, ramas y similares. De manera que, como es de esperar, entre mayor materia vegetal en el agua mayor será el color. De forma excepcional, el color también puede estar asociado a la presencia de hierro o manganeso de forma coloidal en el agua, pero la materia orgánica será la causa en la gran mayoría de los casos.

Dada la relación del color con la materia orgánica, el nivel puede variar de forma significativa en el tiempo y espacio, para un mismo cuerpo de agua. Se espera mayores niveles de color cuando hay inundaciones o precipitaciones fuertes, y especialmente en las primeras inundaciones luego de la época seca, debido a la acumulación de hojas y demás materia orgánica, que es arrastrada a los ríos. Es así como, para identificar el verdadero rango de color de un cuerpo de agua se requieren análisis de color de forma periódica, especialmente si se pretenden usar el cuerpo de agua como una fuente de abastecimiento (Enviromental Protection Agency , 2001).

El Reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficiales, indica valores ideales de color de 2,5 Pt-Co a 10 Pt-Co, para garantizar la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuática (Gobierno de Costa Rica , 2007).

Sólidos totales

En lo que corresponde a los sólidos totales se refiere a la cantidad de materia sólida presente en el agua, para su determinación se seca la muestra a temperaturas a 105 °C o a180 °C, siendo la última la más aceptada en los estándares europeos. Los sólidos totales indican la cantidad de materia orgánica e inorgánica de la muestra de agua (Enviromental Protection Agency , 2001).

Alcalinidad

La alcalinidad se puede definir como la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones, el cual representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, debido a la capacidad que brinda de resistir a los cambios de pH en el agua. La alcalinidad total típicamente es menor a 50 mg/L principalmente en áreas húmedas con suelos lixiviados, aunque puede encontrarse en concentraciones mayores en zonas con suelos más fértiles y clima árido, y se

pueden dar concentraciones de hasta de 400 mg/L, sin que represente una afectación para la calidad del agua en sí (Enviromental Protection Agency , 2001).

En aguas naturales la alcalinidad puede atribuirse a la presencia de carbonatos e hidróxidos, e incrementa la capacidad del carbono inorgánico para realizar la fotosíntesis en aguas con pH bajo a moderado. Consecuentemente, la alcalinidad está involucrada en los efectos de la eutrofización, debido a que cuando ocurren altos niveles de fotosíntesis, se consume una gran cantidad de dióxido de carbono por parte de las algas, cuando todo el dióxido de carbono libre es consumido se produce más en una serie de reacciones de equilibrio químico, el efecto global de la reacción es que se producen más iones hidroxilos por lo que aumenta el pH, en caso de darse este proceso es de sumo cuidado pues el pH puede llegar a niveles peligrosos (Enviromental Protection Agency , 2001).

Nitrato

El nitrato (NO_3^-) de origen mineral que se encuentra en el agua naturalmente es relativamente poco, en su mayoría es originado por fuentes orgánicas e inorgánicas, generalmente por descarga de aguas residuales o por la escorrentía de fertilizantes artificiales, respectivamente. No obstante, el nitrato también puede encontrarse en los cuerpos de agua como un subproducto de la oxidación bacteriana y la fijación de nitrógeno realizado por las plantas.

El nitrato como tal no es tóxico, pero resulta una amenaza para la salud en aguas de consumo debido a su conversión a nitrito. El nitrato es un indicador de contaminación menos reciente, pues está en las últimas etapas del ciclo del nitrato. En la mayoría de los casos, valores anormales de nitrato van a indicar la escorrentía de fertilizantes artificiales en las tierras dedicadas a agricultura, por lo que es de suma importancia su monitoreo, debido a que estos patrones suelen incrementarse con el tiempo, con mayor prioridad si se trata de fuentes para agua de consumo. Según la EPA, en concentraciones superiores a 50 mg/L de NO_3^-representa una amenaza para la salud (Enviromental Protection Agency , 2001).

Nitrito

El nitrito (NO_2^-) se encuentra naturalmente en concentraciones muy bajas, incluso cuando se trata de efluentes de plantas de tratamiento los valores son relativamente bajos, esto principalmente debido a que el nitrógeno tiende a existir en formas más reducidas como lo es en el amoníaco (NH_3), o más oxidado como el nitrato (NO_3^-). Dado que el nitrito es una etapa

intermedia en la oxidación del amoníaco al nitrato, niveles altos de nitrito son un indicar de contaminación más reciente, y por lo tanto indicadores de calidad del agua cuestionable. Se considera que en aguas superficiales un valor superior a 0,03 mg/L NO_2^- es un indicar de contaminación por aguas residuales.

El nitrito de ser consumido en altas concentraciones puede reaccionar con la hemoglobina, produciendo metahemoglobinemia, también conocida como la enfermedad del bebé azul debido al cambio en la coloración de la piel que produce, dado que la enfermedad afecta el transporte de oxígeno en la sangre produciendo la asfixia, y es sumamente peligrosa para los niños. Según la EPA, en concentraciones superiores a 50 mg/L de NO_3^-representa una amenaza para la salud (Enviromental Protection Agency , 2001).

Nitrógeno Amoniacal

El nitrógeno amoniacal (NH_3^-) generalmente se encuentra presente de forma natural en los cuerpos de agua producto de la actividad microbiológica, aunque en muy bajas concentraciones. Si el nivel de concentración determinado está por encima de 0,1 mg/L, es un indicador de contaminación con aguas residuales domésticas o industriales, por ende, es de esperar la presencia de microorganismos patógenos, asimismo, se puede intuir que la contaminación es reciente.

En lo que concierne a la vida acuática, se considera recomendable, según la EPA, concentraciones entre 0,005 mg/L y 0,025 mg/L de forma óptima, debido a que el nitrógeno amoniacal no ionizado es el más dañino para la vida acuática, y la compleja relación que existe entre la concentración de nitrógenos amoniacal, el pH y la temperatura, afecta el valor de amoniaco total (Enviromental Protection Agency , 2001).

Fósforo

El fósforo puede estar presente de forma natural en los cuerpos de agua, o bien, puede ser producto de la interacción con materia orgánica, ya sea de vertidos de agua residual, contacto con la vegetación, entre otros. El ensayo que se utiliza permite la determinación más completa del elemento fósforo, pues abarca todos los compuestos en los que se presenta el fósforo en el agua, lo que hace menos ambigua la interpretación del parámetro en comparación con otras versiones de la prueba.

El fósforo total ha sido utilizado como uno de los más representativos indicadores en la evaluación de la eutrofización en investigaciones realizadas en lagos, no obstante, este parámetro presenta la problemática de que no todo el fósforo medido en las condiciones de prueba puede o va a estar disponible en el medio para estimular el crecimiento de las algas. Sin embargo, se hace la recomendación de que para agua donde existe vida acuática, valores superiores a 0,062 mg/L, puede ser un indicador de que es necesario reducir la eutrofización, a pesar de eso, este no es un parámetro regulado en Costa Rica (Enviromental Protection Agency , 2001).

Coliformes fecales

Los coliformes fecales son un género de bacterias que se utilizan como indicadores de la presencia de microorganismo patógenos provenientes de los desechos fecales de humanos y animales, lo cual puede deberse al contacto con heces de la vida animal que se desarrolla en los alrededores de los cuerpos de agua, o como de vertidos de aguas residuales relativo a actividades humanas, entre otros (Enviromental Protection Agency , 2001).

El reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficiales sugiere que el desarrollo de actividades recreativas en contacto directo se debe hacer en agua con una cantidad igual o menor a 1000 NMP/100mL (Gobierno de Costa Rica , 2007).

Escherichia Coli

Escherichia Coli es un subgrupo bacteriano dentro del género de coliformes fecales, su uso se ha extendido indicador universal debido a que presenta mismas o mejores características de supervivencia que los patógenos. Además, presenta las ventajas de ser fácilmente detectables e identificables, son del mismo origen que los patógenos (intestino animal o humano), se presenta en cantidades mucho mayores que los patógenos, y están presentes siempre que los patógenos están presentes. De modo que su presencia en una muestra de agua es un indicador se ha producido contaminación fecal, y por lo tanto existe la amenaza de la presencia de patógenos en el agua (Enviromental Protection Agency , 2001).

Enterococos

Enterococcus es un género de bacterias algunos miembros del grupo tienen propiedades patógenas, de manera que su presencia significa que en el cuerpo de agua evaluado hay

vertidos de aguas residuales o similares, pues estos organismos se originan en las heces, tanto humanas como animales. No obstante, la principal razón por la que estos organismos se utilizan como indicar es porque los organismos se pueden determinar de manera confiable y sencilla, además son de gran utilidad para establecer la calidad del agua en casos donde la muestra no presenta E. Coli, pero sí un gran número de bacterias coliformes en grupo. La EPA recomienda que en aguas superficiales el conteo de enterococcus no supere 200 NMP/100 ml (Enviromental Protection Agency , 2001).

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ESCENARIO DE EXPOSICIÓN

3.1 Caracterización morfométrica

Con el objetivo de conocer el comportamiento de las cuencas, se realizó su caracterización morfométrica, en la que se determinaron las características generales, asociadas al relieve, a la forma y a la red de drenaje. Para esto se realizó un modelo de elevación digital (MED) a partir de las curvas de elevación de 1: 50 000, lo cual indica una separación de 20 metros entre curvas, estas son las curvas con mayor detalle que existen de la zona de estudio. El modelo de elevación digital se realizó en QGis, que es un *software* libre de geoprocesamiento.

A continuación, se presenta el MED creado para la cuenca del río Agujitas, en la Figura 13 se puede observar el rango de elevaciones que va desde los 0 msnm hasta 600 msnm, las elevaciones se concentran hacia el Sureste de la cuenca. Asimismo, se puede observar la red de drenaje de la cuenca.

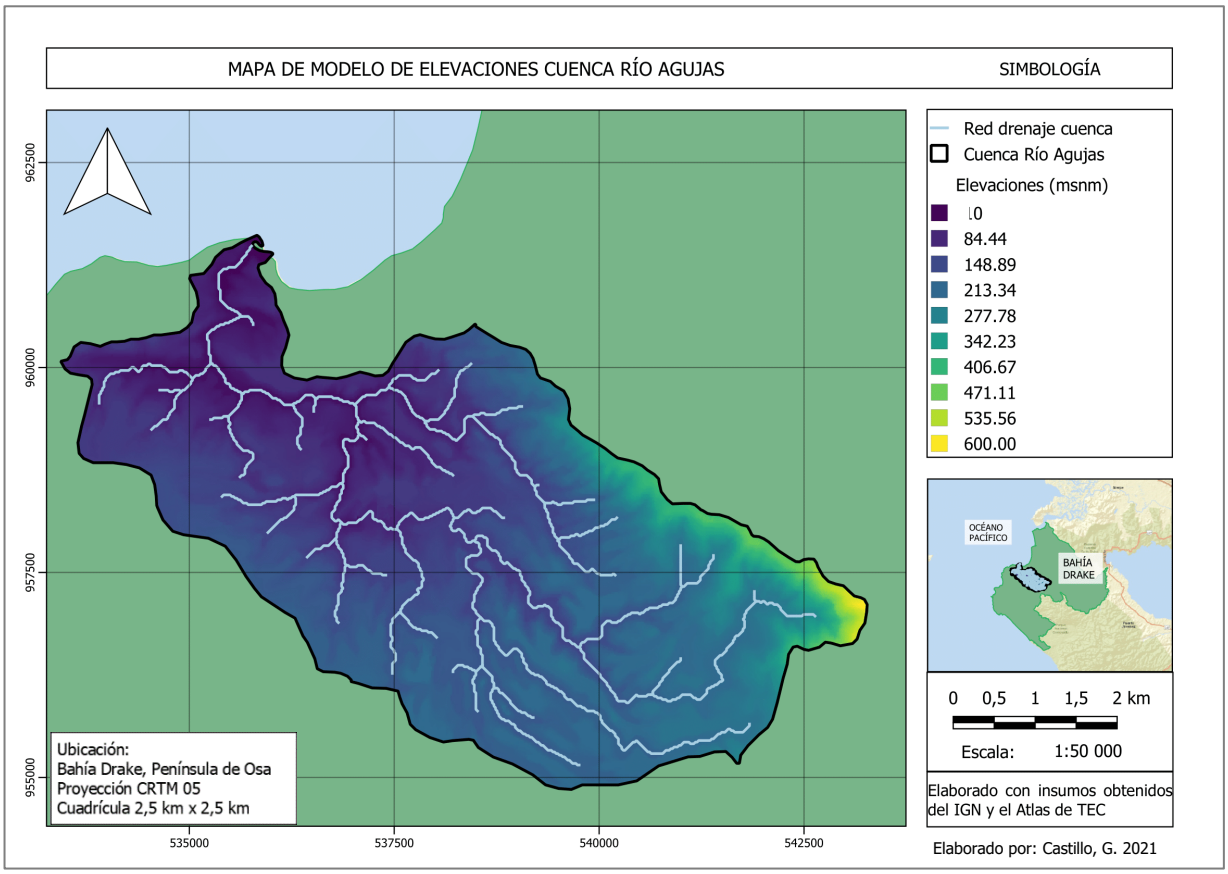


Figura 13. Modelo de elevación digital para la cuenca del río Agujas

Seguidamente, se presenta el MED de la cuenca de la quebrada El Mono, la cual pertenece a lo que se conoce como la cuenca de las quebradas de playa Colorada. No obstante, en la visita de campo se corroboró que la cuenca de playa Colorada tiene dos desembocaduras, de manera que se estudiaron por aparte, dada que por definición la cuenca hidrográfica debe tener una sola desembocadura, de modo que todas las aguas fluyen hacia un mismo punto. Lo anterior también fue posible corroborarlo con el análisis del DEM, donde se puede apreciar la presencia de una formación de mayor elevación, llegando a ser la mayor elevación de la cuenca con 107,68 msnm, en el sector Sureste de la cuenca, el cual es el límite con su cuenca vecina de la quebrada Don Carmen.

En la Figura 14 también se puede observar el drenaje propuesto para la cuenca, debido a que la información geográfica disponible para el país en la zona de estudio posee una escala de 1:50 000 y no existen datos de drenaje para la cuenca de playa Colorada. La propuesta se realiza según el análisis del MED, además, se confirmó su ubicación con los datos tomados en campo. No obstante, la longitud del cauce puede ser ligeramente distinta, dado que este parámetro no fue posible determinarlo en campo, pues se encontraba en una zona donde el ingreso era por propiedad privada.

Otro aspecto importante, es que en el MED se puede observar en el sector este de la cuenca, una depresión que podría indicar la formación de una pequeña quebrada. Sin embargo, debido a que en la visita de campo no fue posible su determinación, se decidió no incluirlo, aunado a esto, como se puede observar en el MED, el área de contribución a esta quebrada es muy pequeña, por lo que se espera el impacto no sea significativo.

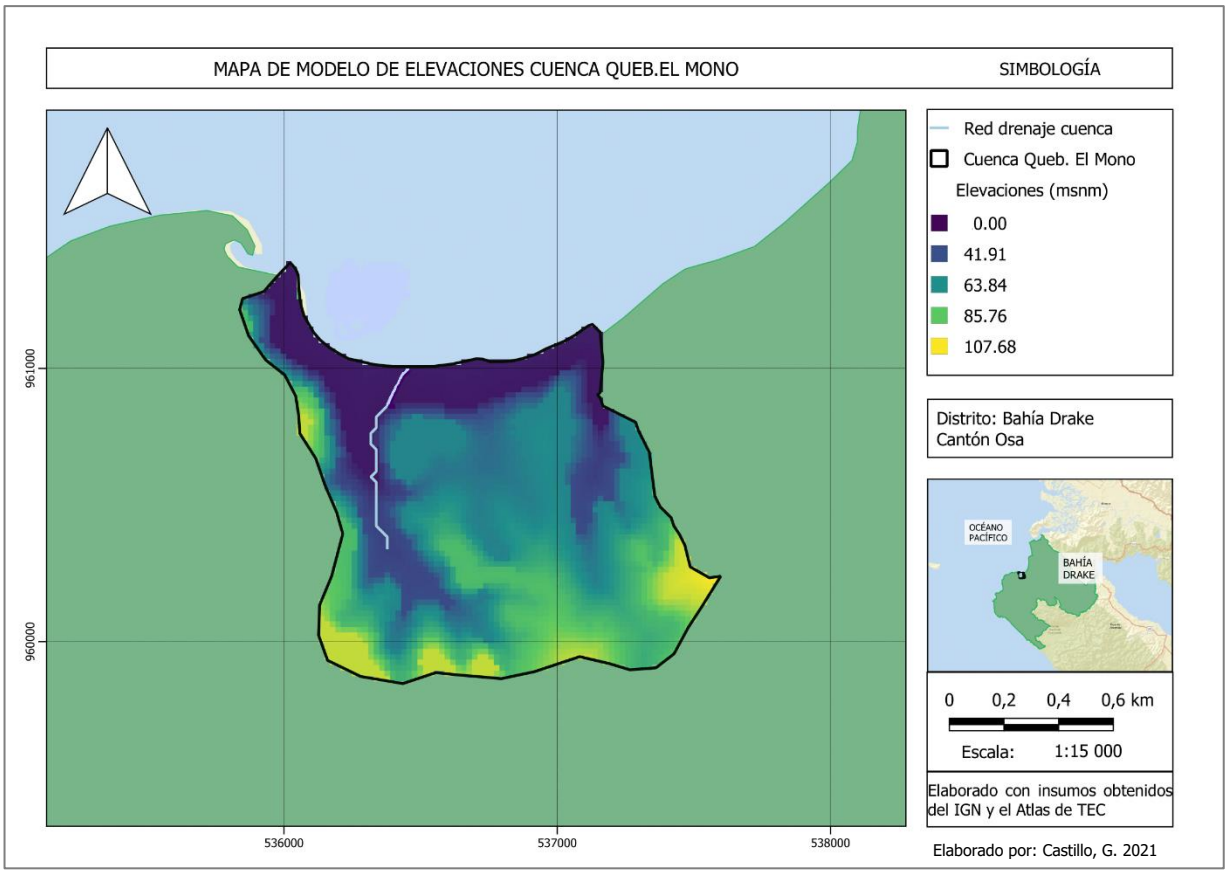


Figura 14. Modelo de elevación digital para la cuenca de la quebrada El Mono

Por último, se muestra el MED de la cuenca de la quebrada Don Carmen, en la Figura 15, esta es la otra parte de la cuenca de playa Colorada, donde igualmente se puede observar el aumento de elevación, ahora en el sector oeste de la cuenca, que indica la ubicación de la línea divisoria de aguas con su cuenca vecina. En este MED se puede observar que la elevación total en esta cuenca es mayor, llegando a 220,95 msnm en el sector este de la cuenca, que es lo más alejado del centro poblacional de Agujitas.

En lo que corresponde a la red de drenaje, la situación es similar que para la cuenca El Mono, de modo que lo que se presenta es la propuesta de la red de drenaje, según el geoprocesamiento del MED y la corroboración de la visita de campo. No obstante, no fue posible establecer el punto final de la red de drenaje, por su dimensión y difícil acceso.

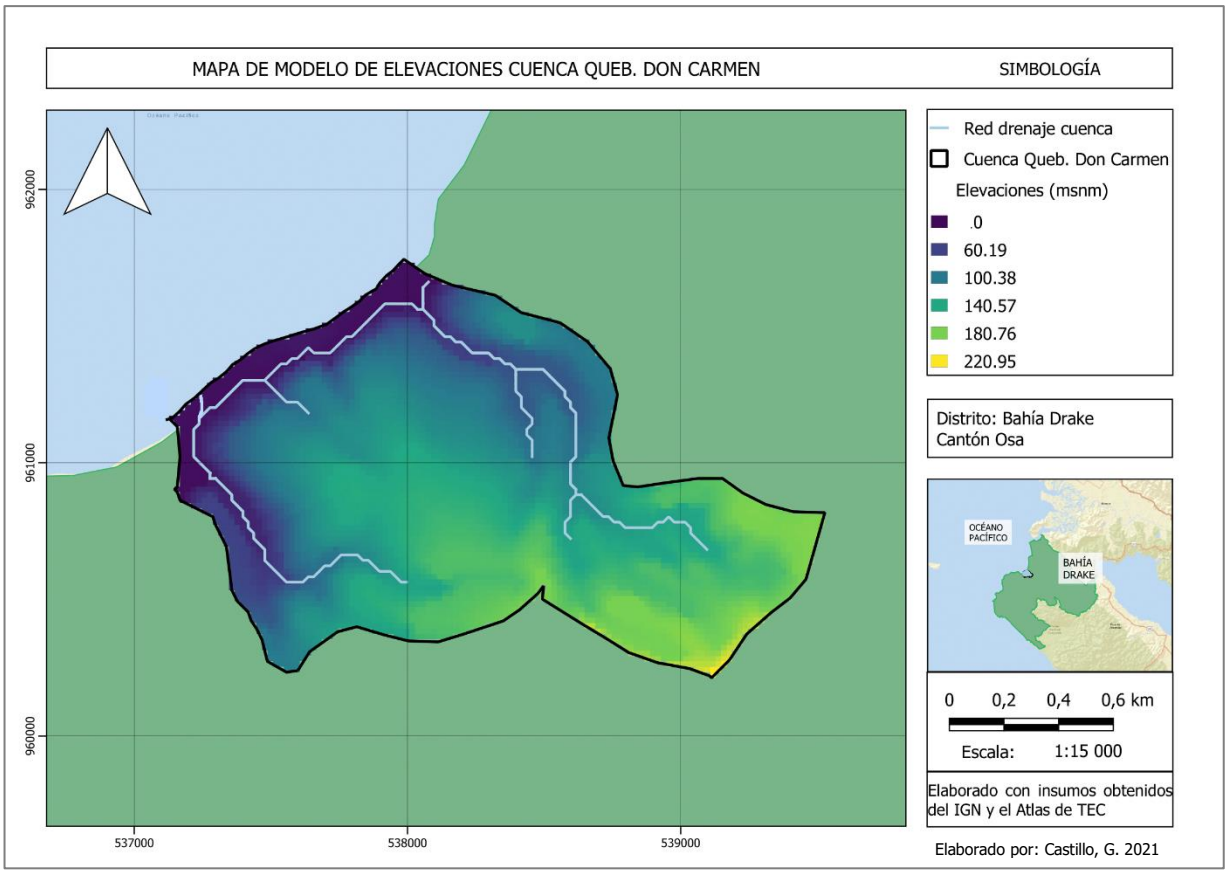


Figura 15. Modelo de elevación digital para la cuenca de la quebrada Don Carmen

Cabe destacar que tanto para la quebrada del Mono como para la quebrada Don Carmen se presenta la ubicación aproximada las desembocaduras en la playa, no obstante, la información disponible no es suficiente para dar un punto específico en la playa.

3.1.1 Resultados de parámetros morfométricos generales

De acuerdo con los modelos de elevación digital presentados en las Figura 13, Figura 14 y Figura 15 se determinaron mediante geoprocesamiento en el Qgis los parámetros morfométricos generales de la cuenca, tal como se presenta en el siguiente Cuadro 8.

Cuadro 8. Parámetros morfométricos generales

Parámetro	Simbología	Unidades	Cuenca		
			Río Agujas	Queb. El Mono	Queb. Don Carmen
Área	A	km^2	31,39	1,51	2,13
Perímetro	P	km	29,26	5,86	7,13
Longitud máxima	L_M	km	10,32	2,05	2,42
Longitud cauce principal	L_{CP}	km	15,54	1,09	2,72
Ancho de la cuenca	B	km	3,04	0,74	0,88
Desnivel altitudinal	DA	m	600,00	107,68	220,95

Como se puede ver del cuadro anterior, en lo que corresponde a la cuenca del río Agujas, es importante resaltar que se tiene un área relativamente pequeña, en términos generales. Seguidamente, el desnivel altitudinal es lo esperado en la región cercana a la costa, pues la variación de altura del punto más alto a la desembocadura es poca, de manera que posee el comportamiento típico de ríos de planicies, con bajas velocidades. Asimismo, Un dato importante es la longitud del cauce principal, que como se puede observar es aproximadamente 5 km más largo que la longitud máxima de la cuenca, lo que también confirma su región de procedencia al ser un río que busca perder energía de forma suave sobre el terreno.

Por parte de las cuencas de El Mono y Don Carmen, se puede observar que son cuencas pequeñas, según algunos autores se clasifican como microcuencas por su tamaño, por lo que es de esperar un caudal directamente proporcional. Luego, específicamente en lo que corresponde a la cuenca El Mono, se presenta que la longitud del cauce principal es cerca de la mitad de la longitud máxima de la cuenca, de lo que se puede intuir una cuenca mal drenada. Mientras que la cuenca Don Carmen, la longitud del cauce principal es muy cercana a la longitud máxima de la cuenca, de modo que se espera una cuenca con mejor capacidad de drenaje.

3.1.2 Resultados de parámetros morfométricos asociados al relieve

La consideración de los parámetros relativos al relieve es de suma importancia para entender el comportamiento de la cuenca ante eventos de precipitación, así como identificar los patrones de escorrentía esperables. En ese sentido, inicialmente se presenta el mapa de pendientes de

las cuencas, en el que se muestra de forma resaltada en verde los sectores de mayor pendiente. Es importante considerar que en estas áreas se puede esperar procesos de erosión más abrasivos.

En la siguiente Figura 16 se muestra el mapa de pendientes correspondiente a la cuenca del río Agujas, en el cual se puede apreciar que la concentración de las pendientes se hace cerca del cauce del río y en las zonas de mayor altura de la cuenca. Lo que a vez muestra como existen grandes planicies en la cuenca, con cambios de nivel suaves.

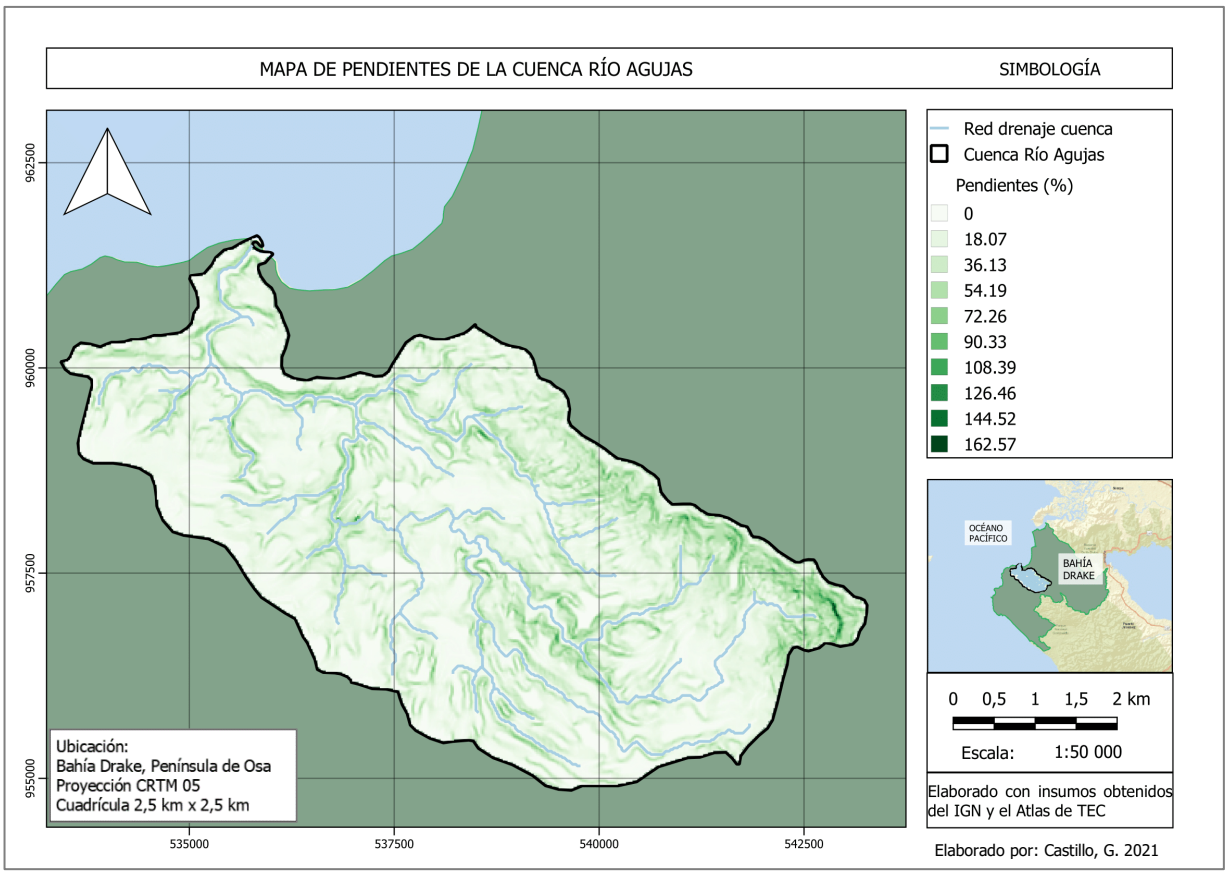


Figura 16. Mapa de pendientes de la cuenca del río Agujas

Seguidamente, en la Figura 17 se muestra el mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada El Mono, en este se presenta un comportamiento similar al anterior, en el cual se puede observar la concentración de las pendientes más pronunciadas cerca del cauce de la quebrada y hacia la línea divisoria de agua de la cuenca, específicamente en el sector oeste. Otro aspecto importante, es que en la parte central de la cuenca se puede observar una zona de bajas pendientes, rodeada por las pendientes atribuibles al cauce y a la salida al mar, en ese sector

se ubica el centro de Agujitas, que corresponde al centro poblacional más densificado del distrito de Bahía Drake, también conocido como Drake.

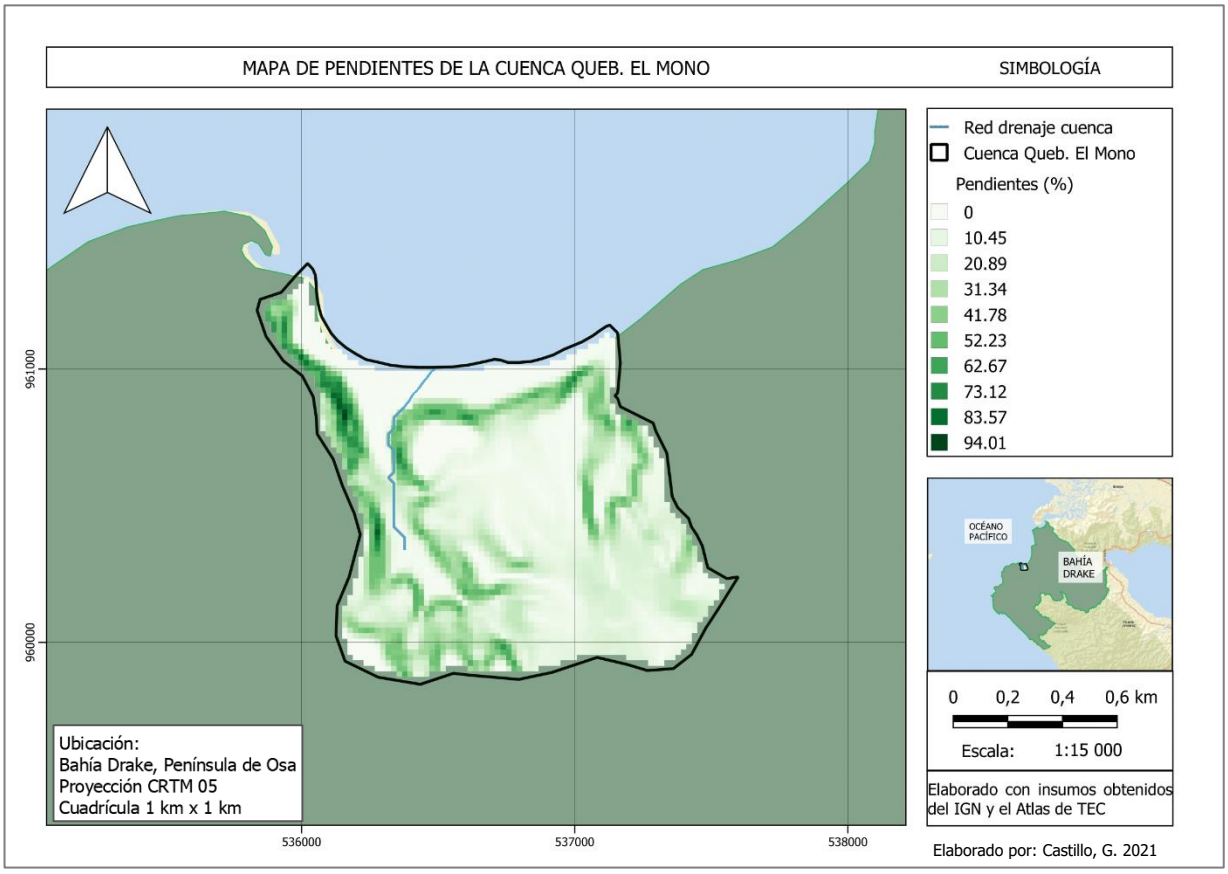


Figura 17. Mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada El Mono

Por último, se muestra en la Figura 18 el mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada Don Carmen, para este caso se puede observar que existe una distribución más homogénea de las pendientes en la cuenca, con excepción de la sección cercana a la costa donde existe una clara acentuación de la pendiente que termina en la quebrada. Además de esto, resalta la presencia de una zona central de poca pendiente y variaciones muy suaves, en la que no se destaca ningún curso de agua, en este punto es importante recordar que los cauces que se muestran son producto del geoprocesamiento del modelo de elevación digital, de manera que el modelo de pendientes responde a este.

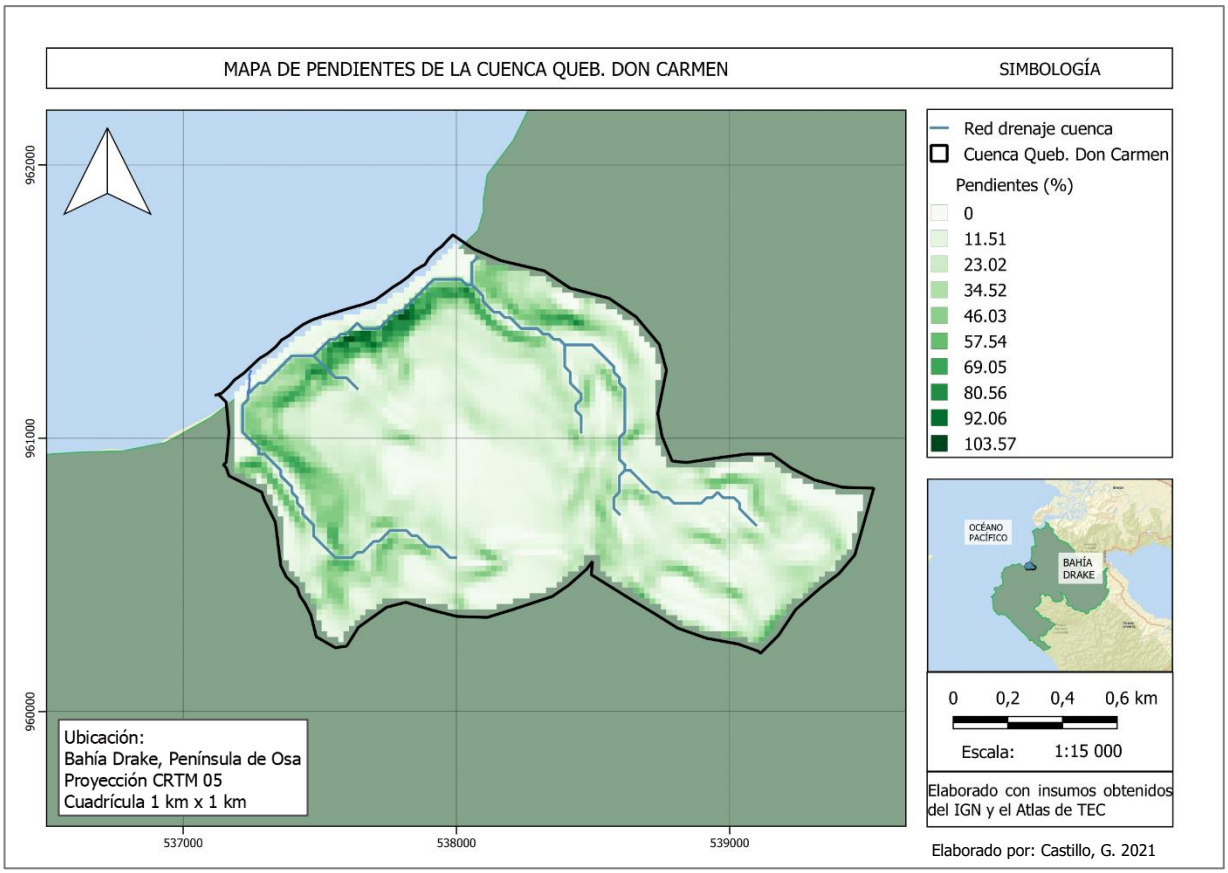


Figura 18. Mapa de pendientes de la cuenca de la quebrada Don Carmen

Seguidamente, se presentan los resultados del análisis del relieve en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Parámetros morfométricos asociados al relieve

Parámetro	Simbología	Unidades	Cuenca		
			Río Agujas	Queb. El Mono	Queb. Don Carmen
Cota máxima	$H_{máx}$	msnm	600	108	221
Cota mínima	$H_{mín}$	msnm	0*	0*	0*
Elevación media	H_{med}	msnm	142	58	117
Altitud más frecuente	H_{frec}	msnm	187	59	144
Altitud mayor del cauce	$H_{máxc}$	msnm	325	58	137
Altitud menor del cauce	$H_{mínc}$	msnm	0	0	0
Pendiente media de la cuenca	S_{med}	%	21 %	19 %	22%
Pendiente cauce principal	S_c	%	2 %	4 %	5 %

*Elevación mínima de las curvas de nivel disponibles

En lo que corresponde a la cuenca del río Agujas, se puede observar que la pendiente media de la cuenca, la cual se calculó utilizando el modelo planteado según la Ecuación (1), es de 21 % lo que se considera un valor moderado de pendiente, indicando que puede existir una adecuada escorrentía superficial. Lo cual se complementa con lo presentado en la Figura 16 en el que se puede observar las pendientes suaves en la mayoría de la cuenca. Por otro lado, se presenta que la pendiente media del cauce principal, la cual se determinó utilizando la Ecuación (2) es de 2 %, lo que indica un flujo lento y sinusoidal de las corrientes. Eso está relacionado a la altitud del cauce principal, la que es de 325 msnm, un valor cercano a la mitad de la elevación total de la cuenca, en este punto es importante notar lo relevante que es la cobertura del suelo en la sección suroeste de la cuenca, donde se concentran las principales pendientes.

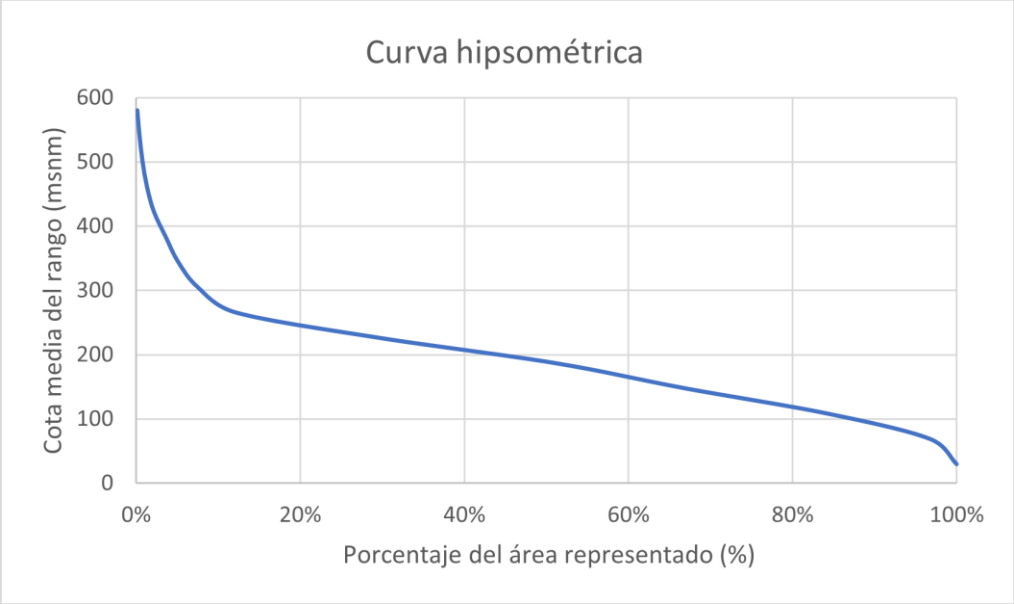
Seguidamente, en lo que corresponde a la cuenca de El Mono la pendiente media de la cuenca es también una pendiente moderada, de modo que, asimismo, se puede esperar una escorrentía superficial adecuada, en lo que corresponde a este parámetro. Otro aspecto relevante en este caso es la similitud de la elevación media con la elevación más frecuente de la cuenca, lo que indica que se trata de una cuenca equilibrada, desde el punto de vista del ciclo de erosión. Por último, la pendiente del cauce tiene un valor de 4 % donde, la elevación máxima del principal es de 58 msnm, mientras que la elevación máxima de la cuenca es de 108 msnm, de manera que, al comparar estos valores con lo que se presenta en la Figura 17, existe una fuerte pendiente sobre la naciente de la pendiente hasta la línea divisoria de aguas, con una diferencia de elevación de cerca 60 metros, y el cauce principal nace cerca de la elevación media de la cuenca, lo cual hace de sumo interés las actividades que se realicen en esta zona y en la parte alta de la cuenca.

Finalmente, en la cuenca de la quebrada Don Carmen, como es de esperar al tratarse cuencas vecinas, también se presenta una pendiente moderada de 22 %, no obstante, es la mayor de las tres cuencas. En esta cuenca la elevación media es de 117 msnm, el cual es un valor bastante mayor que el de su vecina, asimismo, la elevación más frecuente es de 144 msnm, lo que indica mayor acumulación de área en la zona altas de cuenca dado que la máxima altitud de la cuenca es de 223 msnm. En este caso, el cauce principal tiene una pendiente de 5 %, y su elevación máxima es de 136 msnm, siendo este superior a la altitud media de la cuenca, no obstante, considerando la Figura 18, se tiene que la diferencia de la naciente a la línea divisoria

de aguas es de cerca 90 metros, de modo que esta zona es de suma importancia para mantener la calidad del agua de la cuenca.

Los siguientes parámetros empleados para la caracterización del relieve de las cuencas son la curva hipsométrica, tal como se presenta en la Figura 19, así como el histograma de frecuencias de altitudes. A continuación, se presentan los correspondientes a la cuenca del río Agujas.

(a)



(b)

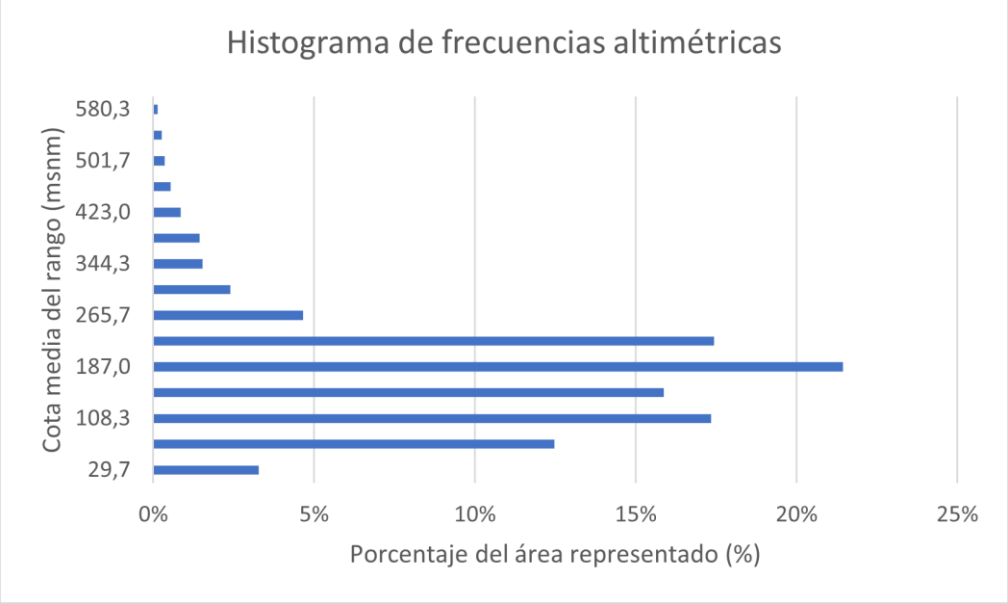
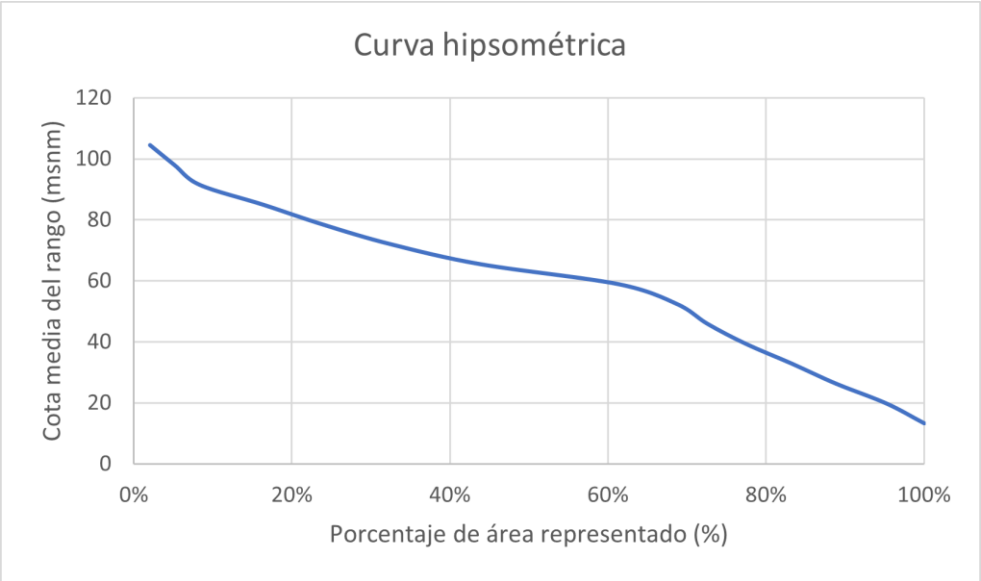


Figura 19.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca del río Agujas

De acuerdo con lo que se presenta en la Figura 19, la curva hipsométrica de la cuenca del río Agujas demuestra que su geomorfología está en una etapa de vejez, o sea que se encuentra en una etapa avanzada de la etapa del ciclo evolutivo de la cuenca. Por lo cual no es de esperar que ocurran más procesos de transformación por medio de la erosión relacionado a causas naturales. Lo anterior se ve respaldado al considerar el histograma de frecuencias altimétricas, en el que se puede notar que existe una gran concentración de área entre las altitudes de aproximadamente 110 msnm a 220 msnm, mientras que las áreas por encima de 450 msnm son menos del 3 %, a pesar de que la altura máxima de la cuenca es de 600 msnm.

(a)



(b)

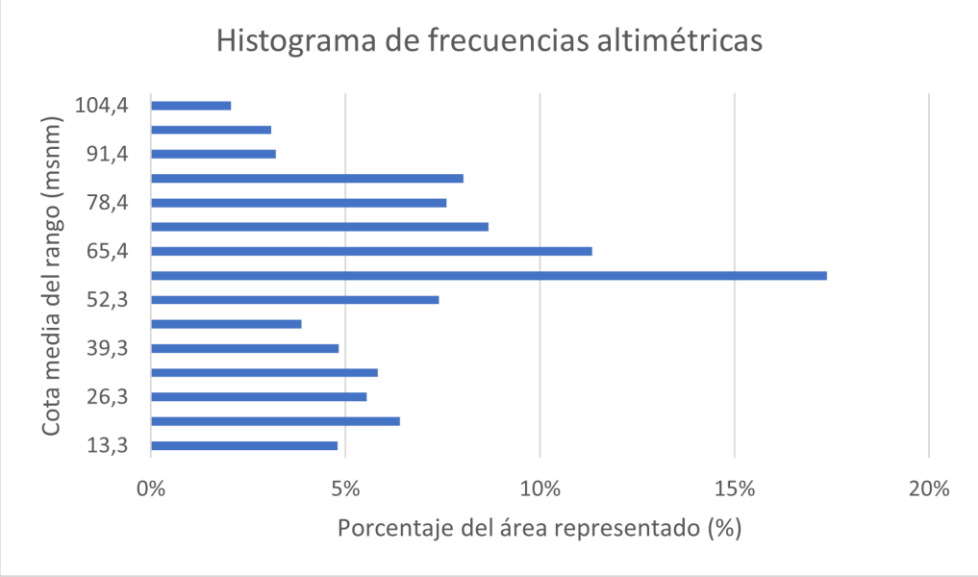
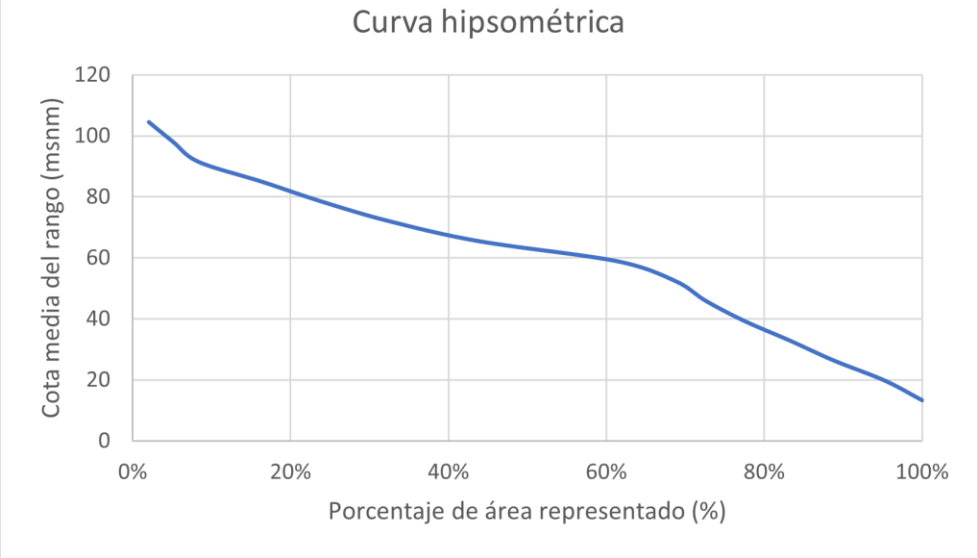


Figura 20.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca de El Mono

Seguidamente, para la cuenca de la quebrada El Mono, según se muestra en la Figura 20, la curva hipsométrica correspondiente muestra una tendencia hacia el equilibrio erosivo, esto es iniciando su etapa madura, pues se puede notar un porcentaje alto de área acumulado para las elevaciones por encima de la media. Lo cual, se puede apreciar más claramente en el histograma de frecuencias altimétricas, pues existe un gran porcentaje de área acumulada entre los 50 msnm y los 80 msnm, mientras que es menor el porcentaje en áreas de menor elevación. Esto se puede atribuir a diferentes procesos erosivos, el tamaño de la cuenca, aunado a transformaciones del entorno producto de la intervención humana.

(a)



(b)

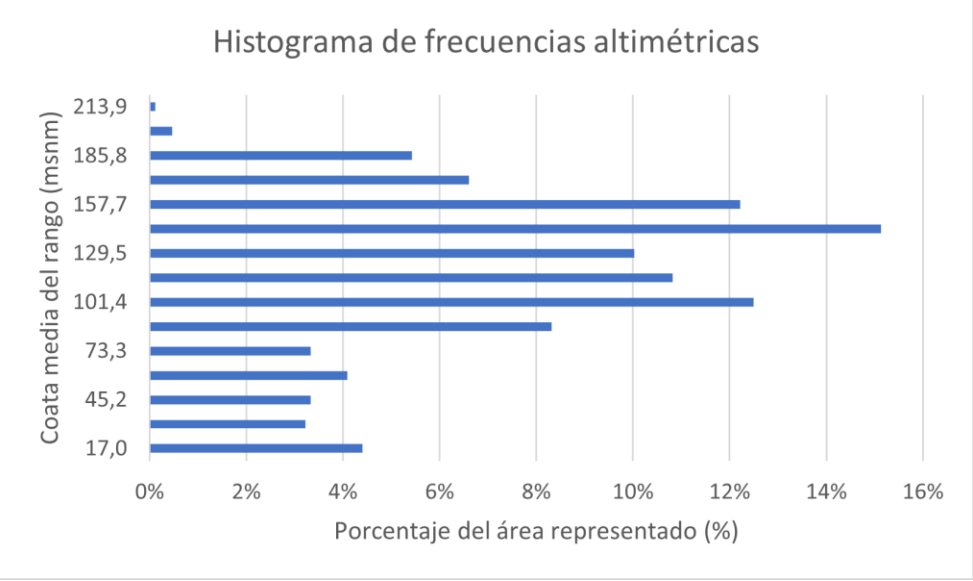


Figura 21.(a) Curva hipsométrica (b) Histograma de frecuencias altimétricas de la cuenca de Don Carmen

Finalmente, en la Figura 21 se presentan los resultados para la cuenca de la quebrada Don Carmen, para el cual se presenta un comportamiento muy similar al que se muestra en la cuenca de la quebrada El Mono. La curva hipsométrica señala que la cuenca se ubica en la etapa de equilibrio del ciclo de erosión, esto es en su etapa madura, y como se puede observar en el histograma de frecuencias altimétricas, se tiene un porcentaje por debajo del 1 % para el área entre los 190 msnm y los 220 msnm que corresponden a la altitud máxima de la cuenca, mientras que entre las elevaciones de aproximadamente 100 msnm y 175 msnm se acumula la mayoría del área. Tanto en el caso anterior, como en este es de esperar que el cambio en la geomorfología de la cuenca, producto de la continuidad del ciclo erosivo de la cuenca, no obstante, es importante mencionar que este proceso puede acelerarse debido a factores antropogénicos, lo cual puede afectar la calidad del agua.

3.1.3 Resultados de parámetros morfométricos asociados a la forma

La evaluación de los parámetros asociados a la forma de la cuenca se hizo considerando tres factores adimensionales, según se presenta en el siguiente Cuadro 10, donde se enlistan los resultados para las tres cuencas.

Cuadro 10. Parámetros morfométricos asociados a la forma

Parámetro	Simbología	Unidades	Cuenca		
			Río Agujas	Queb. El Mono	Queb. Don Carmen
Factor de forma de Horton	k_f	Adimensional	0,29	0,36	0,36
Índice de compacidad	k_c	Adimensional	1,47	1,34	1,38
Coeficiente de circularidad	Cc	Adimensional	0,46	0,55	0,53

Como se puede observar en el cuadro anterior, se presentan resultados similares para las tres cuencas para cada parámetro, como era esperado, debido a que los factores geológicos son los más influyentes en la determinación de la forma de cuenca, y todas son cuencas vecinas.

Primero, en lo que corresponde a el factor de forma de Horton, el cual se determinó según la Ecuación (3) en la que se relaciona el área con la longitud axial. Los resultados muestran que

en todos los casos el valor es menor a 1, de modo que las cuencas tienen una forma poco regular, por lo que es de esperar una respuesta más tardía, en comparación a una supuesta cuenca con la misma área, pero con un resultado de factor de forma mayor, lo cual es positivo en términos de evaluación de la calidad del agua de los cuerpos superficiales (Figura 7).

El segundo factor evaluado es el índice de compacidad, o coeficiente de compacidad, el cual se determinó mediante la Ecuación (4), en la que se relaciona el perímetro de la cuenca con el área de esta. La interpretación del parámetro se hace utilizando la clasificación presentada en el Cuadro 4, donde se señalan 3 clases. Para este caso, las tres cuencas corresponden a la clase II con un rango de clasificación de 1,26 – 1,50, y se consideran ovaladas - redondas a ovales oblongas, no obstante, la cuenca del río Agujas tiene un índice k_c = 1,47, el cual también se acerca a la tercera clase, en la que las cuencas se clasifican como ovales – oblonga a rectangular – oblonga. Lo anterior indica, para las tres cuencas, que no se espera que estas tengan la tendencia de concentrar volúmenes de agua de escurrimiento, y por el contrario es de esperar debido a su forma que la precipitación tenga más capacidad de evacuación por los cauces naturales.

El tercer, y último factor de forma considerado, es el coeficiente de circularidad o de redondez de la cuenca, el cual corresponde a otra interpretación de la relación entre el área y el perímetro de la cuenca, según se presenta en la Ecuación (5). Para este caso se considera entre más cercano a 1 más circular es la cuenca, de manera que los resultados señalan que la cuenca más circular es la de El Mono, mientras que la más alargada es la de Agujas. Lo anterior indica que se espera un hidrograma de creciente más plano para la cuenca del Agujas, mientras que para El Mono uno con un pico de caudal más pronunciado, y de forma similar para la cuenca Don Carmen, esto según se presenta en la Figura 7.

3.1.4 Resultados de parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

Los parámetros asociados a la red de drenaje se calcularon utilizando los elementos generados del geoprocesamiento del MED, según se indicó en la sección 3.1, y corresponde al recorrido de los cuerpos de agua que se presenta en las Figura 13, Figura 14 y Figura 15. En el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos para cada parámetro.

Cuadro 11. Parámetros morfométricos asociados a la red de drenaje

Parámetro	Simbología	Unidades	Cuenca		
			Río Agujas	Queb. El Mono	Queb. Don Carmen
Orden de las corrientes de agua	O_C	-	4	1	2
Longitud total de drenaje	L_T	km	53,83	1,12	4,87
Densidad de drenaje	D_d	km/km^2	1,72	0,72	2,05
Sinuosidad de las corrientes de agua	S	Adimensional	1,87	1,47	1,48
Tiempo de concentración	t_C	h	4,79	1,08	1,15
Tiempo de concentración de Kirpich	t_{Ck}	h	2,35	0,83	0,85

En el Cuadro 11 se presentan los resultados del parámetro de orden de las corrientes, el cual indica el grado de ramificación del cuerpo de agua, de manera que entre mayor sea el número, más rápida será la respuesta esperada de la cuenca. En el caso de la cuenca del río Agujas se puede considerar como con río bien ramificado con un valor de 4, dada su área. Mientras que para las cuencas de la quebrada El Mono y Don Carmen, con valores de 1 y 2, respectivamente, a pesar de que sean microcuencas, son valores muy bajos, lo cual puede ser problemático, debido a que en caso de existir contaminantes que puedan ser arrastrados por la escorrentía superficial, serán todos arrastrados hacia un mismo cauce aumentando la concentración, aunado al aumento de caudal por eventos de precipitación en de forma más directa en los cuerpos de agua, al ser pocos.

Otro indicador útil en ese sentido es la densidad de drenaje, que compara la longitud total de los cauces con el área total de la cuenca, según se señala en la Ecuación (6). En este caso un valor de 0,5 km/km^2 es considerado un drenaje pobre, mientras que un valor de 3,5 km/km^2 indica una cuenca bien drenada. De manera que, la cuenca de El Mono se considerara una cuenca mal drenada, lo que corresponde con lo que se presenta en el MED. La cuenca de Don Carmen es la mejor drenada con un valor de 2,05 km/km^2, a pesar de que en el MED se presente una zona central sin cauces, pero es esperable dado su tamaño. Finalmente, la cuenca

del Agujas presenta un valor intermedio de 1,72 km/km^2, que se puede interpretar como una cuenca con un drenaje moderadamente bueno.

Seguidamente, el parámetro de sinuosidad de las corrientes permite tener una idea de la velocidad de flujo del cuerpo de agua, según su forma, tal que entre más lento sea el flujo más sinuoso va a ser, en este parámetro un valor de 1,25 indica un cauce prácticamente de alineamiento recto, y entre mayor el valor más indica más serpenteo del cuerpo de agua. En este caso las cuencas de El Mono y Don Carmen obtuvieron valores sumamente similares de 1,47 y 1,48, respectivamente, el cual indica que los cauces son bastante rectilíneos, y por ende se espera una velocidad de flujo moderada. Por otro lado, la cuenca del río Agujas tiene una sinuosidad de 1,87, el cual es un valor más alto, lo que indica que mayor pérdida de energía del agua a través del cauce y con esto menores velocidades de flujo.

En términos generales la velocidad de flujo en los tres cuerpos de agua evaluados es baja, lo cual es relevante de considerar en términos de la aireación del flujo, ya que a bajas velocidades no existen rápidos en el curso que puedan oxigenar el agua de forma natural, y si le agrega el condicionante de la cercanía a la costa, principalmente relevante en el caso de las quebradas de El Mono y Don Carmen, existe poca capacidad de recuperación de la calidad del agua previo a su incorporación a la costa.

Finalmente, se utilizaron dos ecuaciones distintas para la medición del parámetro de tiempo de concentración, el primero es la versión propuesta por Giandotti expresa en la Ecuación (8), y la segunda es la versión de Kirpich representada en la Ecuación (9), la principal diferencia entre ambas es que la segunda considera la pendiente promedio del cauce principal, y la primera lo hace relacionando la elevación media de la cuenca y la longitud del cauce principal. Para la cuenca del río Agujas, se tiene un tiene valores de 4,79 h y 2,35 h, los cuales, aunque son distintos se mantienen en un rango aceptable de similitud, este tiempo de retención hidráulica es relativamente pequeño dada el área de cuenca, seguidamente para las cuencas de El Mono y Don Carmen los valores son sumamente similares, ligeramente mayores para la cuenca de Don Carmen como es de esperar al tener un área mayor, en este caso los valores son menores cercanos a 1 h.

Esto es especialmente importante a considerar el tiempo de autodepuración del cuerpo de agua, así como la capacidad de sedimentación y arrastre de material particulado en un evento de precipitación.

3.2 Uso del suelo

Las actividades que se realizan en el escenario de exposición definido son de suma relevancia para establecer posibles fuentes de riesgo, así como sus respectivas causales. Aunado a esto la variación en el tiempo que haya tenido el uso de suelo es un aspecto que considerar para identificar los riesgos pasivos que puedan amenazar la zona de estudio.

3.2.1 Clasificación supervisada de imágenes satelitales

Con el objetivo de analizar el cambio en el uso del suelo en el área de estudio se utilizaron imágenes multiespectrales del satélite Landsat, dado que son de fácil acceso con gran cantidad de información disponible y periodicidad regular. Asimismo, el uso de imágenes multiespectrales presenta una gran ventaja para el análisis de los datos debido a que es posible tener información de los diferentes rangos de longitud de onda. De acuerdo con los datos presentados en el Cuadro 5, actualmente solo dos satélites de los lanzados por este proyecto se encuentran activos, que son el Landsat 7 y el Landsat 8, los cuales fueron puestos en órbita en 1999 y en el 2012, respectivamente, y son los utilizados en el presente proyecto, pues los satélites anteriores del proyecto presentaban información más limitada.

Sin embargo, como se mencionó con anterioridad el satélite Landsat 7 tuvo una falla técnica en el 2002, de manera que las imágenes disponibles de 2002 a la actualidad de este satélite presentan el error *Scan Line Corrector*, de modo que en el presente estudio se prescinde de estas, pues los espacios de información faltante pueden ser de hasta 450 metros, y aunque es posible interpolar para tener posible información, no es posible corroborar que esos sean los datos reales. De manera que, los años que en los que se realiza el análisis son 2000, 2014, 2016, 2018 y 2020.

Las imágenes utilizadas constan de diferentes bandas para cada longitud de onda, en el caso de las imágenes del 2000, estas fueron captadas por el satélite Landsat 7, de modo que tiene 8 bandas espectrales, según se presenta en el Cuadro 6. Mientras que, para el análisis del

2014, 2016, 2018 y 2020, se utilizaron las imágenes del Landsat 8, el cual consta de 11 bandas espectrales de acuerdo con lo que se presenta en el Cuadro 7. No obstante, las requeridas estaban disponibles en ambas versiones, que fueron para el Landsat 7 las bandas 1-Azul, 2-Verde, 3-Rojo, 5-Onda corta infrarroja (SWIR) 1, 7-Onda corta infrarroja (SWIR) 2, mientras que para el Landsat 8 las bandas utilizadas fueron la 2-Azul, 3-Verde, 4-Rojo, 5-Infrarojo Cercano, Onda corta infrarroja (SWIR) 1, y 7-Onda corta infrarroja (SWIR) 2.

Las bandas de azul, verde y rojo representan el espectro visible y permiten hacer la representación RGB (*Red-Green-Blue)* que corresponde a la vista en color natural. La banda del infrarrojo cercano es muy importante para el análisis de la vegetación, pues las plantas sanas se reflejan, debido a el agua en sus hojas, de manera que utilizando la combinación 5-4-3 (Landsat 8) y 4-3-2 (Landsat 7), se hace la representación de Infrarrojo, en el cual los tonos rojos fuertes representan la vegetación sana, los rojos claros corresponde a vegetación dispersa, y los colores claros que tienden al blanco o tonos cafés corresponde a zonas sin vegetación.

Seguidamente, la banda de onda corta infrarroja cubre distintos cortes de la onda corta, las cuales permiten tener información de la humedad de la tierra y diferencias en la composición del suelo. Esta banda se utilizó en la combinación de 7-6-4 (Landsat 8) y 7-5-3 (Landsat 7) para crear imágenes de falso color, en la cual se espera que resalte en tonos verde claros las zonas de pastizales o vegetación muy dispersa, y en verdes brillantes la vegetación más densa, además que en tonos tendientes al blanco o azul las zonas urbanizadas. Lo cual se vuelve una herramienta sumamente útil en el análisis del uso del suelo.

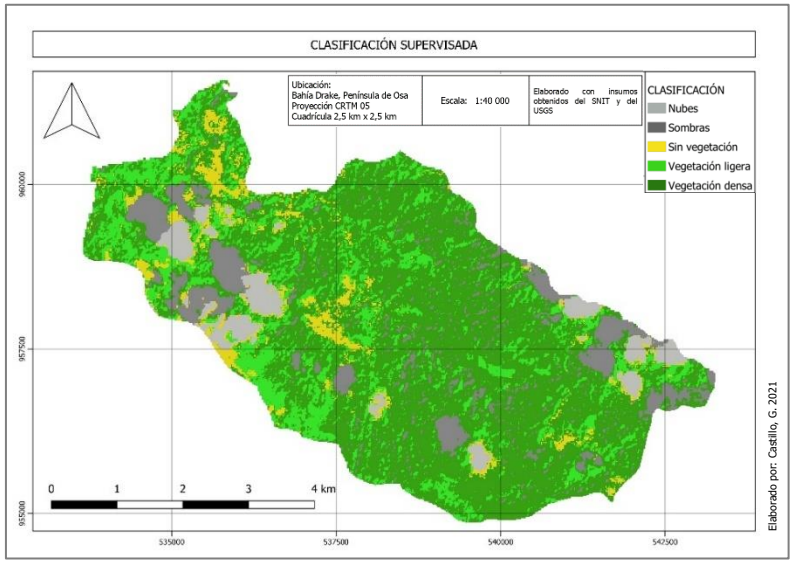
Es importante mencionar que previo a la creación de las imágenes con las diferentes combinaciones antes mencionadas, se realizó el proceso de *pan-sharpening* a cada imagen, mediante el uso de la banda espectral pancromática, para el Landsat 7 y Landsat 8, corresponde a la banda 8. Este proceso permitió tener mejor resolución de las imágenes originales, las cuales pasan de una resolución de 30 metros a una de 15 metros.

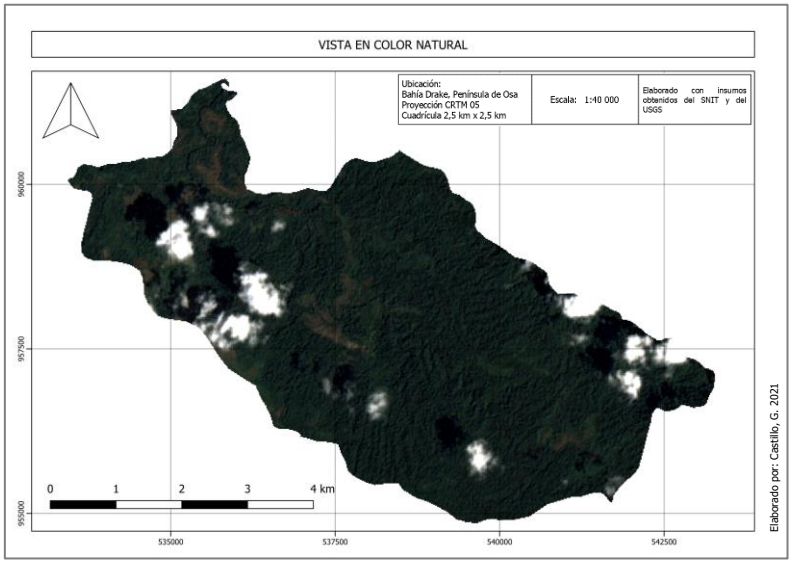
Finalmente, realizó una clasificación supervisada de las imágenes en la que se definieron 5 categorías, las primeras dos son nubes y sombras, las cuales buscan reducir el ruido de los datos pues no fue posible encontrar imágenes sin estas limitantes de datos, la siguiente categoría es sin vegetación, que hace referencia a zonas urbanas, caminos o suelo desnudo, y

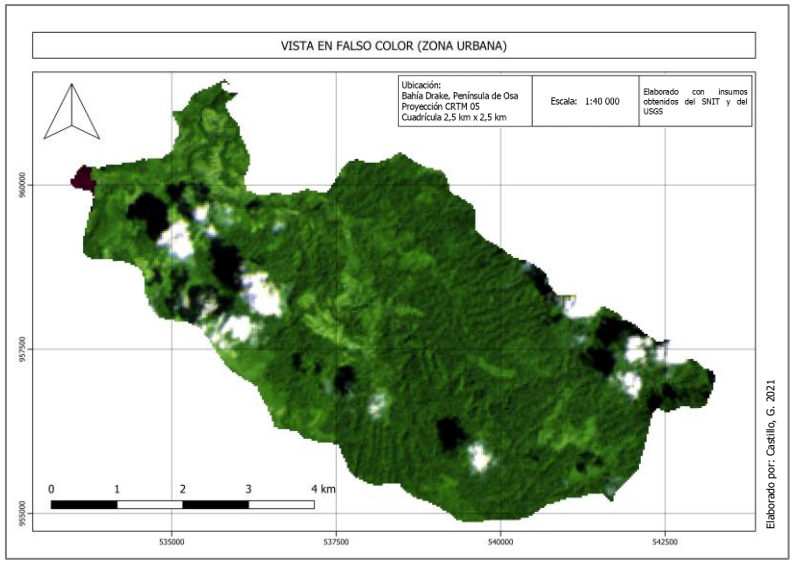
finalmente, dos categorías para caracterizar la vegetación en ligera o dispersa y densa. Este es el resultado del análisis de las imágenes en infrarrojo y falso color. Es importante mencionar que existe un error asociado a la presencia de nubes, a pesar de que se realizó el procedimiento de corrección atmosférica a las imágenes, pues en zonas de nubosidad dispersa se presentan tonos blancos y el algoritmo de clasificación tiene la tendencia a confundirlas con puntos sin vegetación.

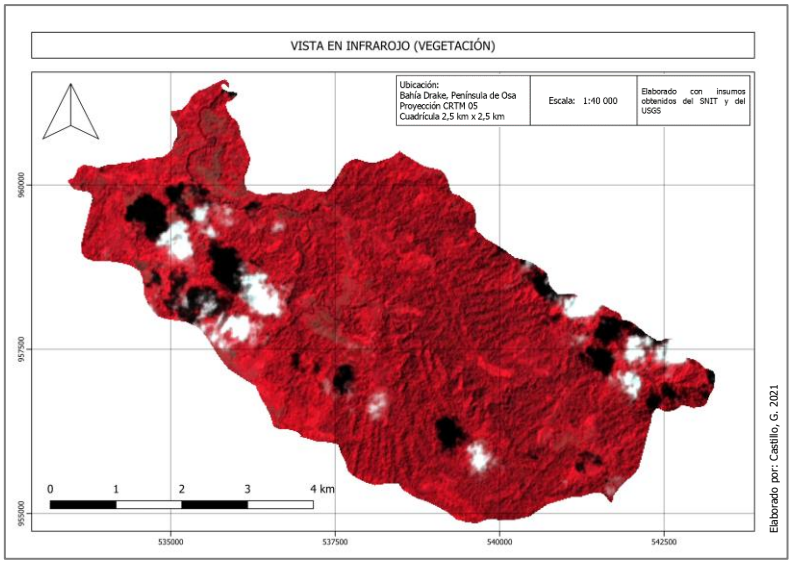
A continuación, se presentan los resultados de la clasificación supervisada de las imágenes, así como su versión en falso color, infrarrojo y color natural para el 2000 y para el 2020 el resto de las imágenes generadas se encuentran en el apéndice del documento. Se presentan primero las imágenes correspondientes a la cuenca del río Agujas y seguidamente las correspondientes a la cuenca de la quebrada de playa Colorada.

RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL CUENCA RÍO AGUJITAS 2000

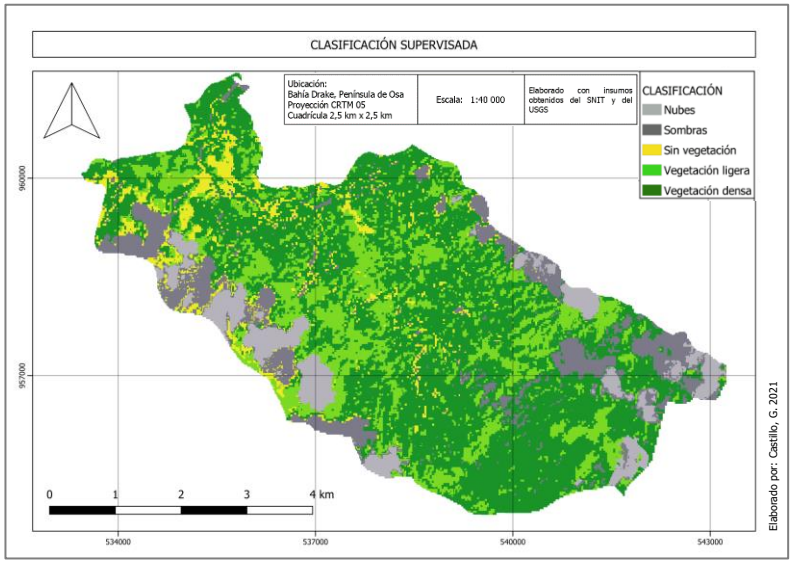


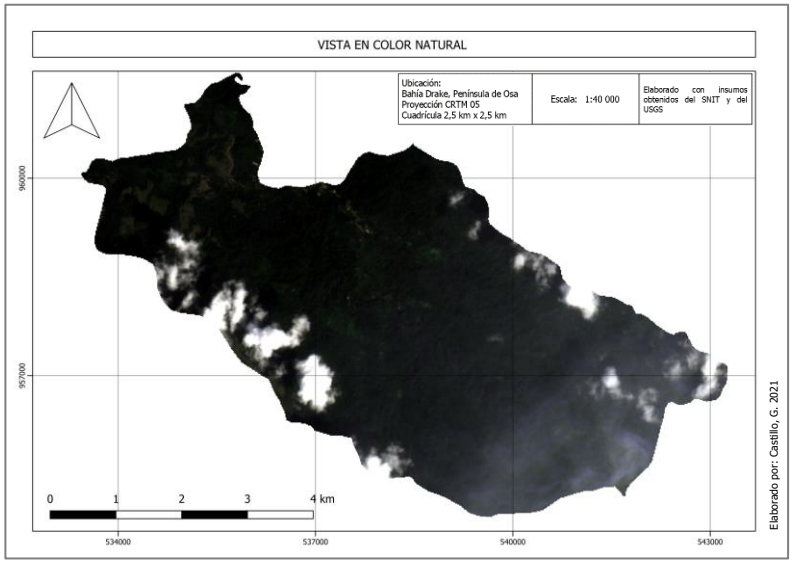


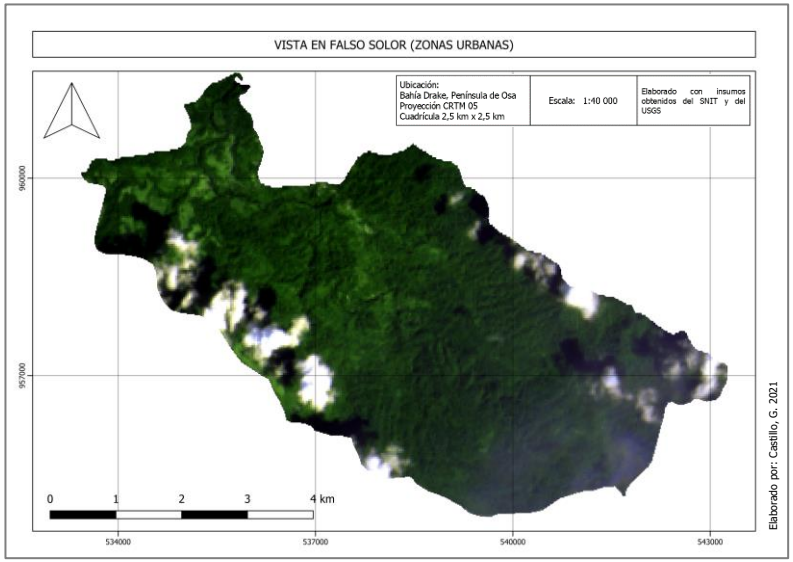


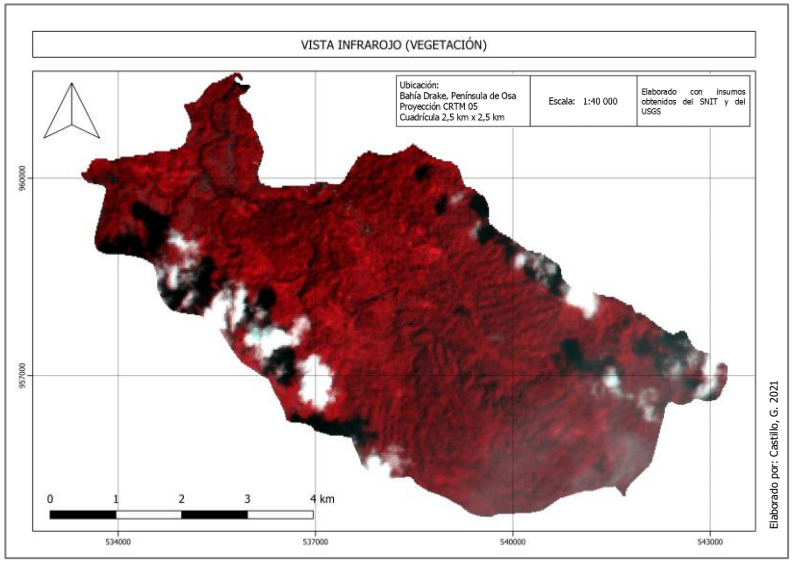


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL CUENCA RÍO AGUJITAS 2020

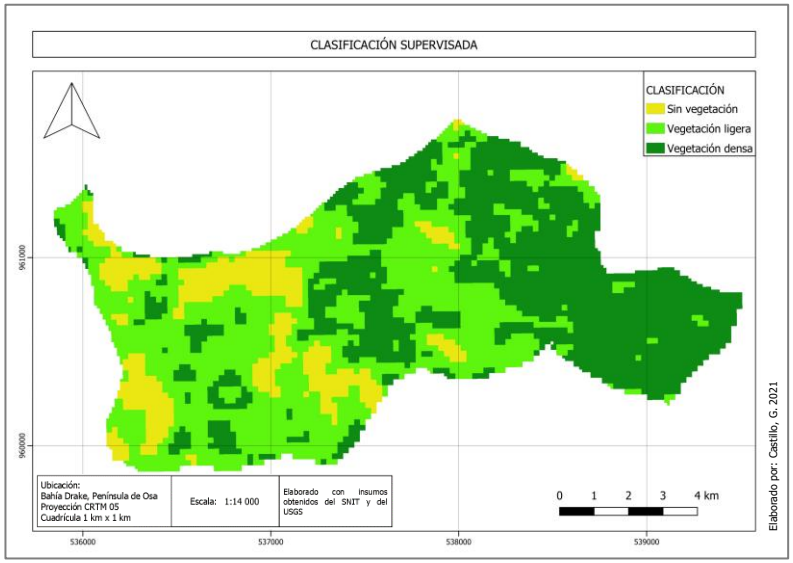


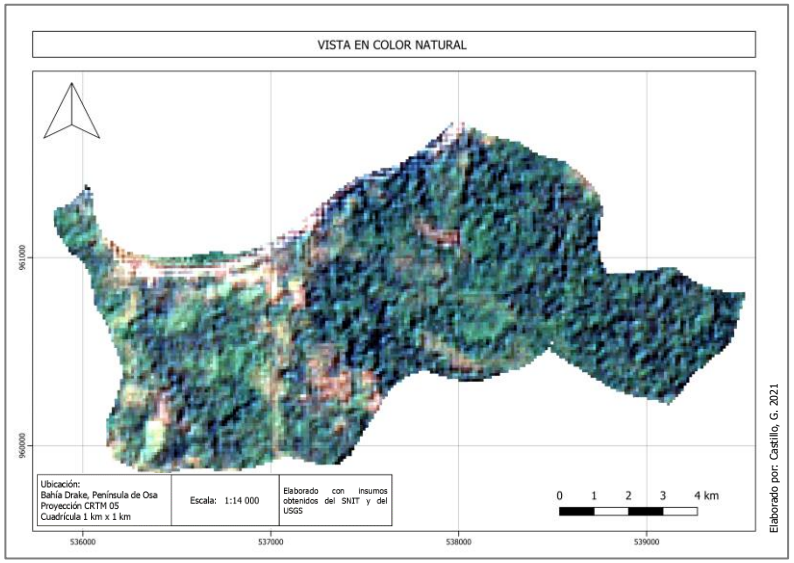


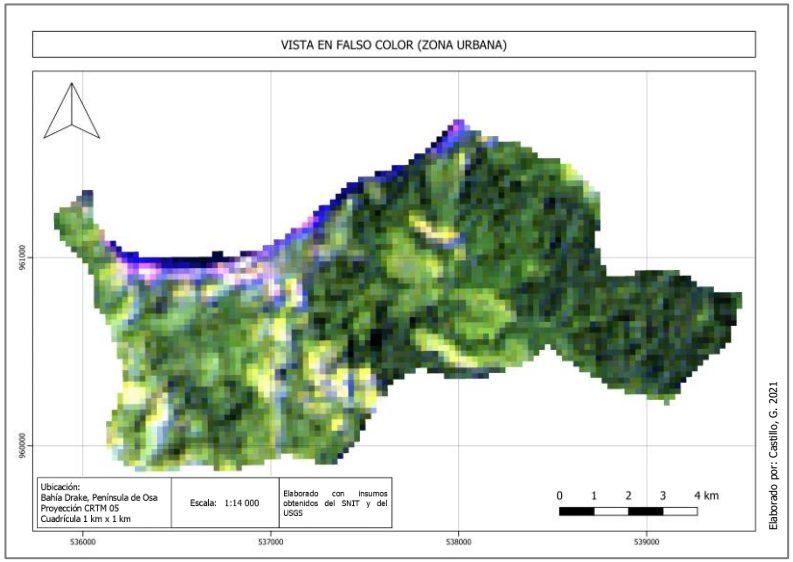


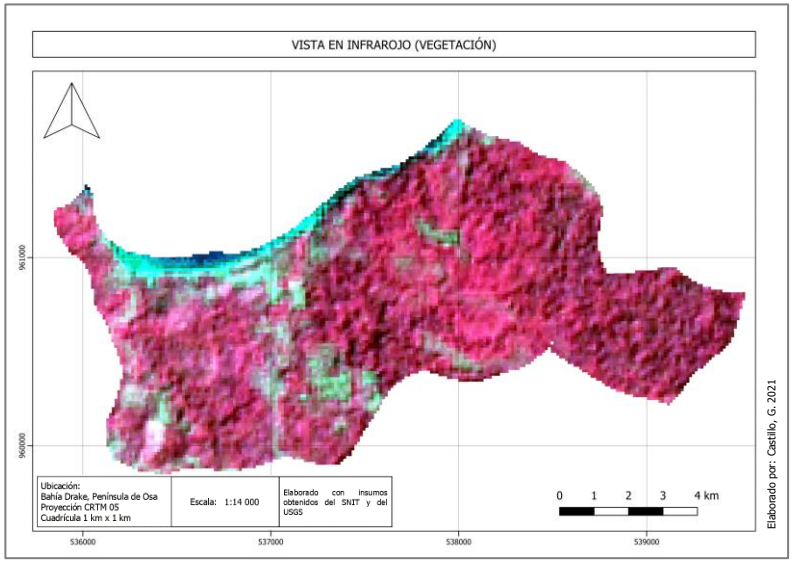


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL QUEB. PLAYA COLORADA 2000

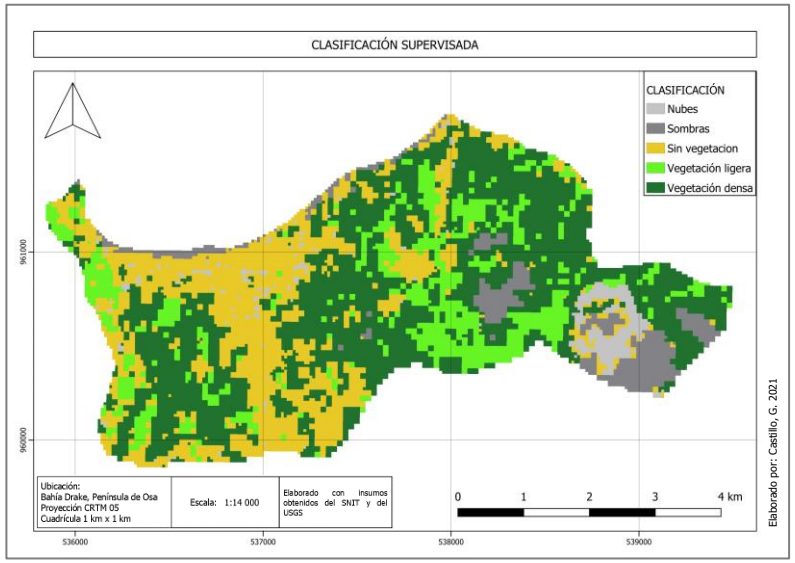


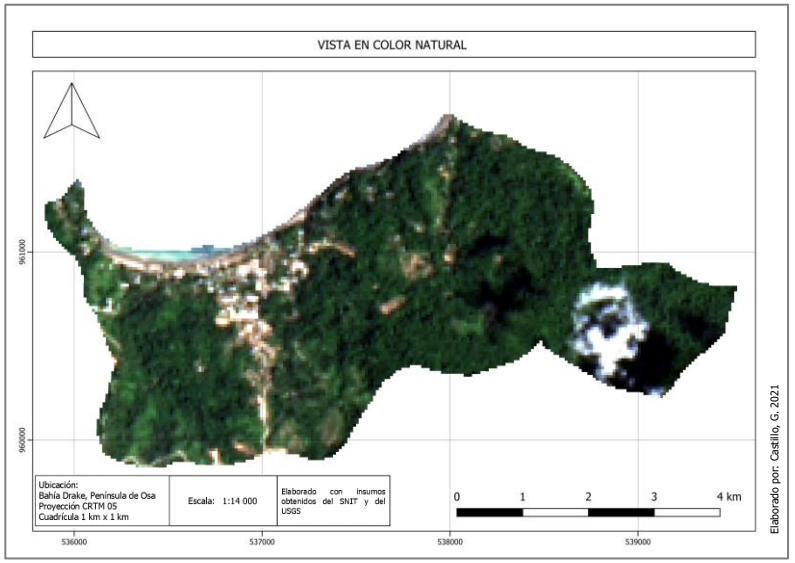


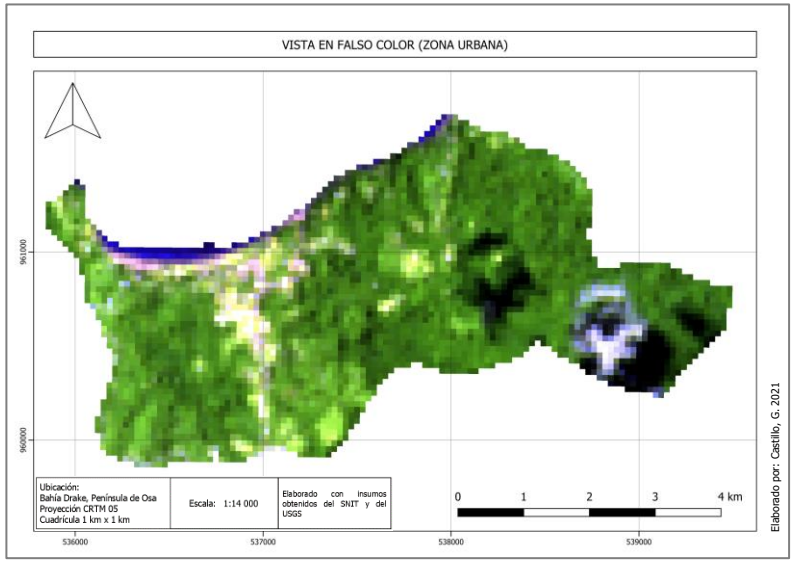


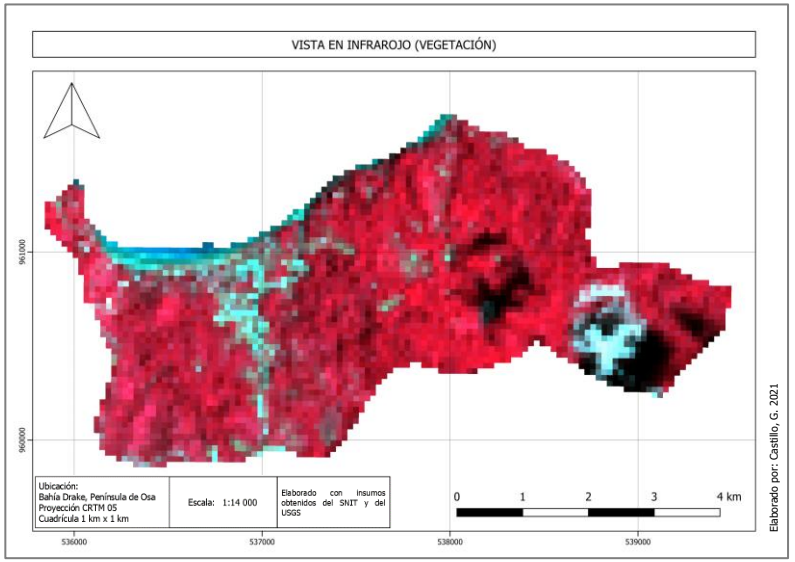


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL QUEB. PLAYA COLORADA 2020









De manera cualitativa se puede apreciar para la cuenca de río Agujas que la parte alta está conformada por vegetación ligera y densa principalmente, lo cual se mantiene desde el 2000 hasta la última revisión en el 2020. No obstante, sí se observa un aumento leve de la vegetación ligera para esa sección de la cuenca. Asimismo, en la parte de la cuenca baja y el sector noroeste existe una mayor concentración de pastizales o suelo desnudo, los cuales igualmente presentan un pequeño aumento del área en el tiempo evaluado. Para cada uno de los años evaluados puede hacerse la comparación de los resultados presentados, según cada una de las combinaciones de las bandas.

A continuación, se representan los valores obtenidos de la clasificación supervisada para cada año evaluado, correspondiente a la cuenca del río Agujas, los valores se muestran en área y en porcentaje.

Cuadro 12. Área de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas

Clase	Área (km^2)				
	2000	2014	2016	2018	2020
Nubes	1,53	2,81	3,03	0,07	2,37
Sombras	3,31	2,39	1,50	1,16	3,81
Sin vegetación	1,82	0,96	2,22	2,35	1,89
Vegetación ligera	6,10	6,93	8,60	7,79	6,71
Vegetación densa	18,45	18,25	15,98	19,97	16,55

Cuadro 13. Porcentaje de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas

Clase	Porcentaje				
	2000	2014	2016	2018	2020
Nubes	4,9 %	9,0 %	9,7 %	0,2 %	7,6 %
Sombras	10,6 %	7,6 %	4,8 %	3,7 %	12,2 %
Sin vegetación	5,8 %	3,1 %	7,1 %	7,5 %	6,0 %
Vegetación ligera	19,6 %	22,1 %	27,4 %	24,9 %	21,4 %
Vegetación densa	59,1 %	58,2 %	51,0 %	63,7 %	52,8 %

En el Cuadro 12 y Cuadro 13 se muestran los valores de área para cada una de las clasificaciones propuesta presentada en km^2 y en porcentaje, respectivamente. En los cuales se puede observar que los valores se mantienen relativamente constantes en el tiempo, con variaciones ligeras, pero en ninguno de los casos se muestra una tendencia clara, esto principalmente se puede atribuir a que para los años 2014, 2016 y 2020 se tiene una gran interferencia de la presencia de nubes y sombras, pues en promedio estas cubren entre 15 % y el 20 % del área.

En ese sentido, es importante notar que la imagen para el 2018 tiene uno de los valores más confiables, pues la cantidad de datos desconocidos por la presencia de nubes y sombras es el más bajo con cerca de 1,2 km^2, que representa el 3,9 % del área, de manera que los valores de ese año podrían ser los más representativos. Seguidamente, se presentan los valores de área del uso del suelo graficados para cada año.

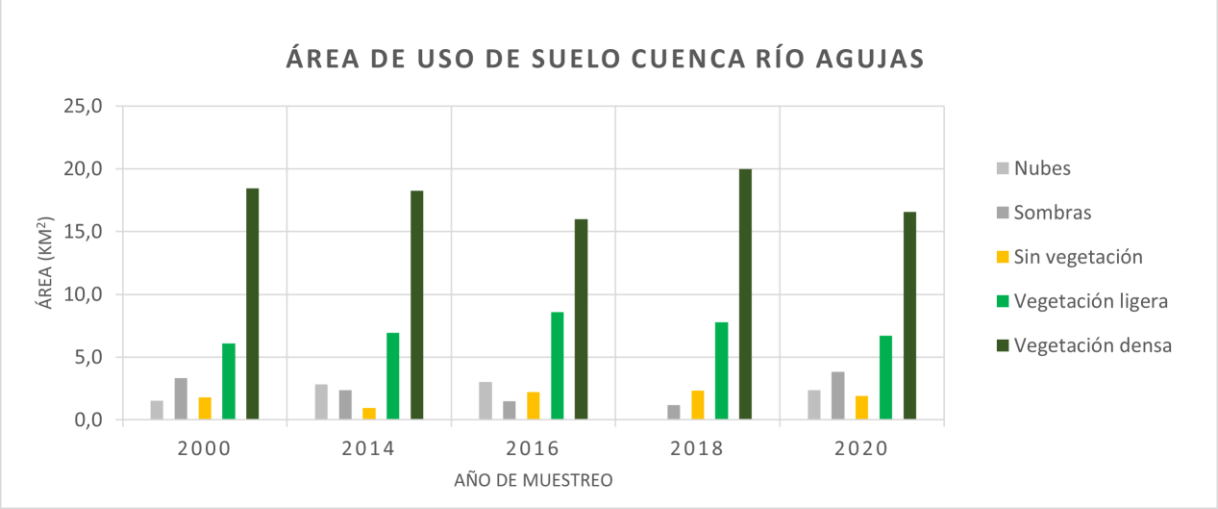


Figura 22. Comparación del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas

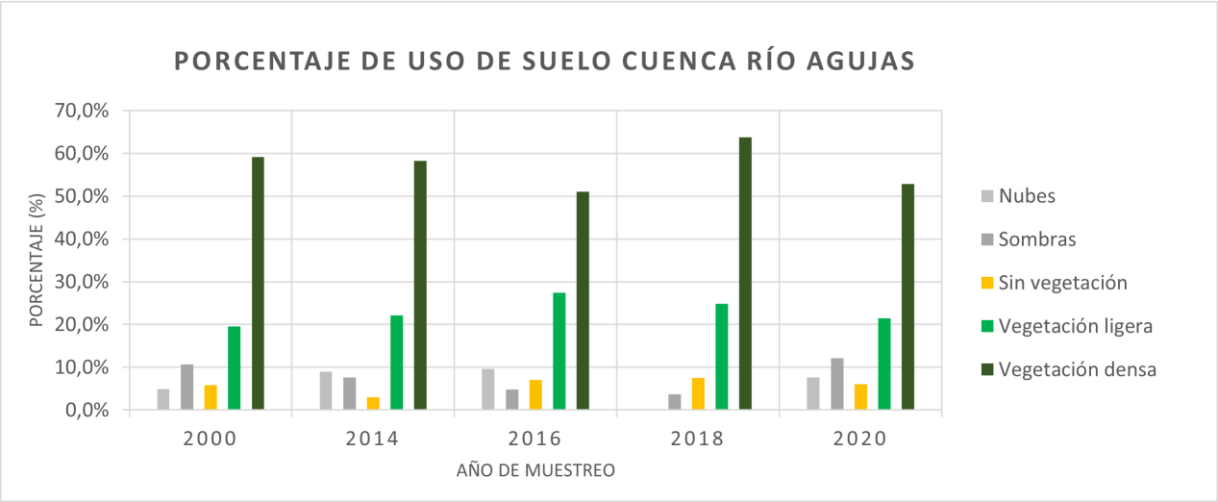


Figura 23. Comparación porcentual del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca del río Agujas

De las Figura 22 y Figura 23, se puede notar claramente como la principal cobertura del suelo es de vegetación densa, seguida por la vegetación ligera, aunque esta última corresponde a cerca de la mitad de la vegetación densa en la mayoría de los casos. En los años 2014 a 2018 se indica un aumento, aunque tenue, de la cantidad del suelo sin vegetación, no obstante, este vuelve a disminuir para el 2020, sin embargo, al comparar con la imagen de clasificación del 2020 se puede notar que parte de la pérdida de información se da mayormente en la sección noroeste de la cuenca, que es donde se concentra el aumento de pastizales y suelo desnudo, por lo que no se puede confirmar la tendencia al alza de este tipo de cobertura, pero es muy probable.

Seguidamente, en lo que corresponde a los resultados de la cuenca de las quebradas de playa Colorada, desde el 2000 es fácilmente identificable el centro de Bahía Drake, pues se presenta una concentración de cobertura sin vegetación, principalmente en la zona de la playa y sus alrededores, además de algunos centros poblacionales descentralizados. Al comparar esta condición, con la que se presenta para el 2014, se puede observar lo que parece una redistribución del espacio, pues se concentra la zona urbanizada, pero se reduce la intervención en la parte alta de la cuenca, en el sector oeste, mientras que el sector este, se mantiene con cobertura vegetal densa en su gran mayoría.

Sin embargo, en los años siguientes del 2016 al 2020 el centro poblacional experimento un crecimiento considerable, y de igual manera sucedió con las áreas de pastizales y suelo desnudo

en las zonas aledañas al centro. Aunado a esto, es posible observar el inicio de la consolidación de un nuevo centro disperso más al este del original, en lo que corresponde la cuenca media. A continuación, se muestran los valores determinados a partir de la clasificación supervisada de las imágenes.

Cuadro 14. Área de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada

Clase	Área (km^2)				
	2000	2014	2016	2018	2020
Nubes	0,00	0,304	0,00	0,00	0,087
Sombras	0,00	0,231	0,00	0,109	0,246
Sin vegetación	0,484	0,425	0,956	0,809	1,018
Vegetación ligera	1,606	0,920	1,263	0,997	0,601
Vegetación densa	1,514	1,731	1,393	1,697	1,659

Cuadro 15. Porcentaje de uso de suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada

Clase	Porcentaje				
	2000	2014	2016	2018	2020
Nubes	0,0 %	8,4 %	0,0 %	0,0 %	2,4 %
Sombras	0,0 %	6,4 %	0,0 %	3,0 %	6,8 %
Sin vegetación	13,4 %	11,8 %	26,5 %	22,4 %	28,2 %
Vegetación ligera	44,6 %	25,5 %	35,0 %	27,6 %	16,6 %
Vegetación densa	42,0 %	47,9 %	38,6 %	47,0 %	45,9 %

Según los valores presentados en los Cuadro 14 y Cuadro 15, se puede observar una tendencia a la disminución de la vegetación ligera, sin embargo, el dato del 2014 no se ajusta a un comportamiento esperado, aunque se debe considerar que en este año se da la mayor pérdida de información producto de la aparición de nubes y sombras, de modo que se puede esperar que esta sea la razón del cambio. No obstante, en el 2000 así como el 2016 se tiene un análisis sin nubes o sombras, en el cual se puede ver claramente que se da una disminución de la vegetación ligera en cerca del 10 %, mientras que la vegetación densa disminuye en 4 % para

que el área sin vegetación aumente en cerca de 13 %. A pesar de la interferencia por nubes y demás este patrón se mantiene.

Otro aspecto importante es que, a pesar de la interferencia de nubes y sombras en el 2020, en comparación con el año 2000 que no tiene interferencia, de modo que los cambios que se registren pueden ser ligeramente mayores por el área clasificada, se tiene un aumento registrado de 50 000 m^2 en cobertura vegetal densa y sana. Sin embargo, se da un aumento de más de 500 000 m^2 en cobertura sin vegetación y la vegetación ligera disminuye en más de 1 000 000 m^2. Estos cambios demuestran la evolución que existe en la cuenca para la urbanización de esta, el cual se acentúa en los últimos 5 años.

Seguidamente se presenta los valores graficados para cada año, de manera que se pueda visualizar más claramente los patrones antes descritos.

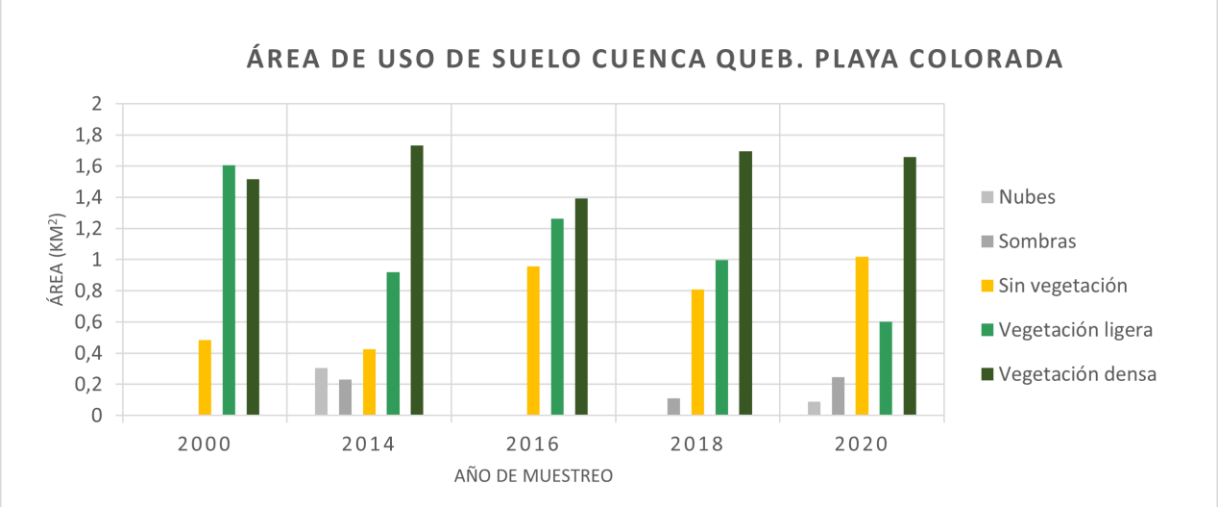


Figura 24. Comparación del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada

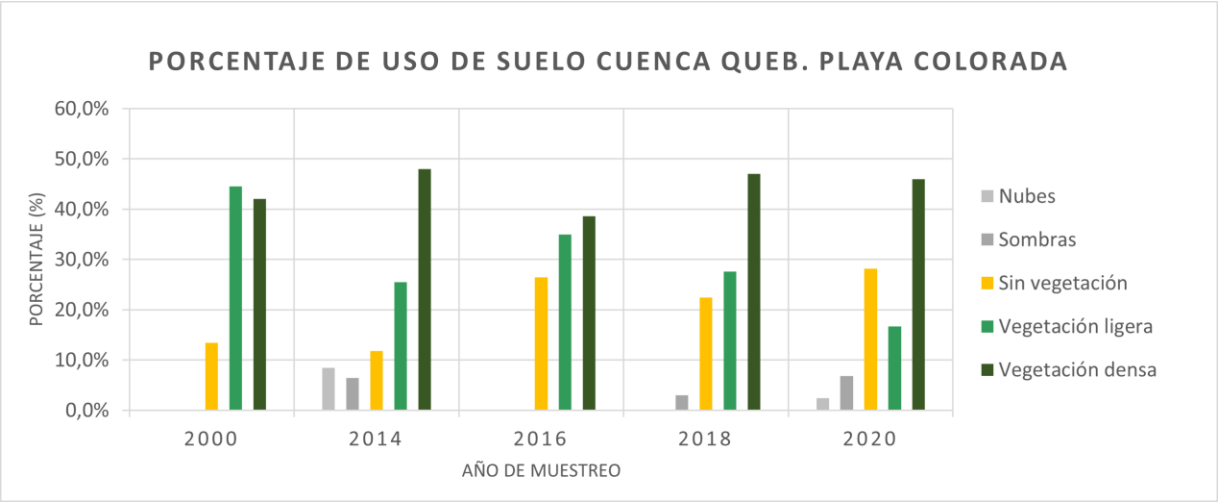


Figura 25. Comparación porcentual del uso del suelo por año según clasificación supervisada para la cuenca de las quebradas de Playa Colorada

En las Figura 24 y Figura 25, se puede observar lo expuesto anteriormente, pues es clara la tendencia a la disminución de la cobertura vegetal ligera para dar paso al aumento de cobertura sin vegetación, principalmente relacionado a el área urbana, aunque también está conformado por suelo desnudo y caminos. Es importante considerar en este sentido que este aumento sucede en todo lo largo de la cuenca, en el sector oeste, de manera que se afecta la cuenca baja, media y alta, esto es relevante pues para conservar la calidad del agua es recomendable el mantenimiento de zonas de vegetación densa en las partes altas de la cuenca. Tal y como sucede principalmente en el sector este de la cuenca, donde se da la permanencia e incluso un ligero aumento de la cobertura vegetal densa.

3.2.2 Áreas de injerencia geográfica

Aunado al análisis del cambio del uso de suelo en el escenario de exposición, se verifica la información geográfica existente de las zonas delimitadas que tengan injerencia en el comportamiento del medio.

Área Silvestre de Conservación Golfo Dulce

Inicialmente, se presenta el Área Silvestre Protegida de Golfo Dulce, la cual se encuentra en la categoría de manejo de Reserva Forestal, definida por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación como bosques especialmente destinados para la producción de madera, los cuales son reforestados gradualmente.

El Plan de Manejo de la Reserva Forestal, publicado en el 2019, señala que la Reserva Forestal tiene una extensión total de 60 097, 8 ha, la cual se distribuye de la siguiente manera, según se presenta en el Cuadro 16.

Cuadro 16.Distribución del área en la Reserva Forestal de Golfo Dulce

Tipo de tenencia	Hectáreas	Porcentaje
Patrimonio Nacional del Estado	3757,12	6,3 %
Terreno Privado	27052,67	45,0 %
Instituto de Desarrollo Rural	13061,12	21,7 %
Ocupantes sin título de propiedad	11602,79	19,3 %
Vacíos de información	1902,01	3,2 %
Territorio Indígena Guaymí de Osa	2722,38	4,5 %

Fuente: (Consejo Nacional de Áreas de Conservación, 2019)

Como se puede observar el 45 % de la reserva está en propiedad privada, y si a esto se le agrega los ocupantes sin título, los vacíos de información y el territorio indígena, estos corresponden a 72 % de la cuenca, mientras que el restante 28 % está en manos del Estado y el INDER. A pesar de tener la clasificación del área, en el Plan de Manejo no se presenta la distribución espacial de los distintos tipos de tenencia en la reserva.

A continuación, se muestra la sección de la Reserva Forestal que interseca con el escenario de exposición.

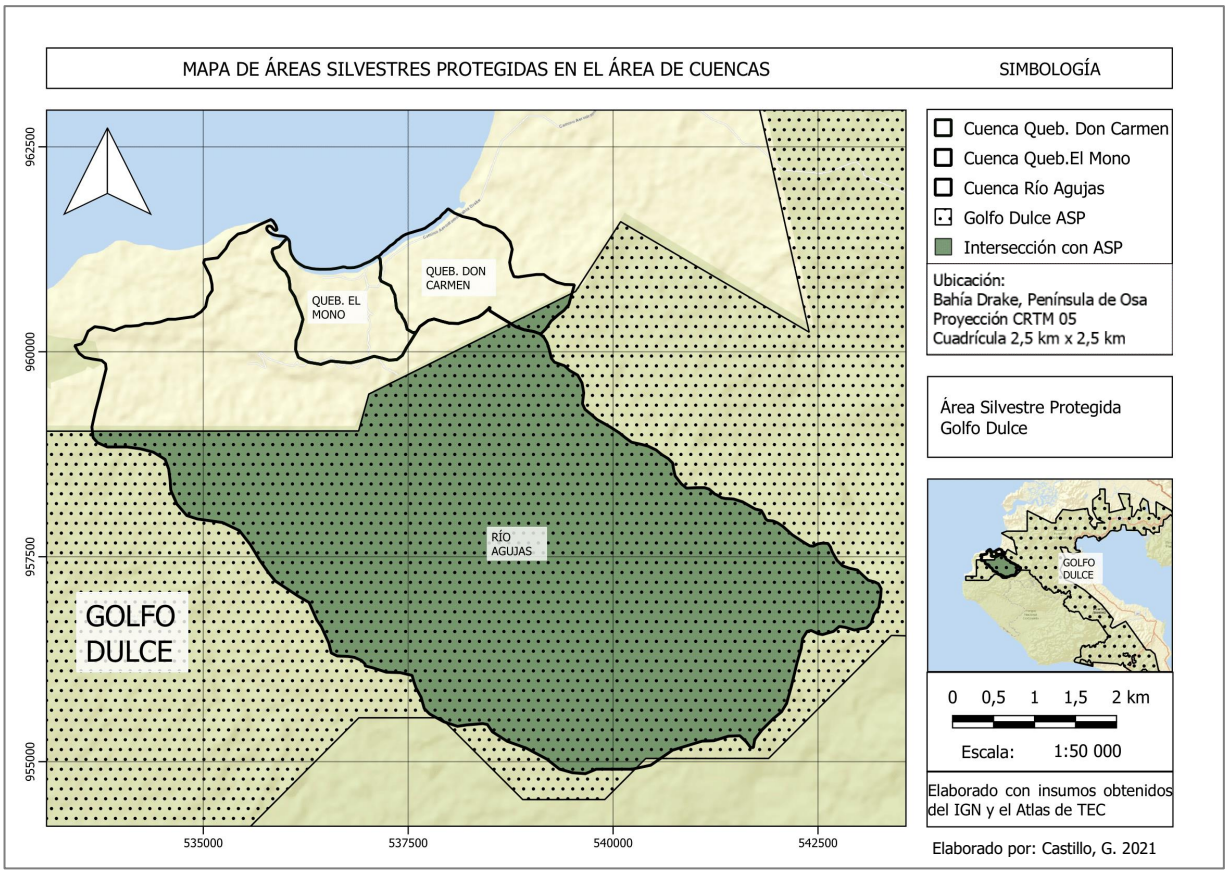


Figura 26. Reserva Forestal Golfo Dulce en el escenario de exposición

De la Figura 26 se puede notar que la sección media y alta de la cuenca del río Agujas está dentro de la Reserva Forestal, y una muy pequeña parte de la cuenca de la quebrada Don Carmen está también dentro de la reserva. Lo cual coincide con los comportamientos mostrados en la sección anterior, de manera que sus características son de interés para la evaluación de riesgos ambientales.

En el Plan de Manejo de la Reserva Forestal establece como elementos focales de manejo los bosques, el sistema hídrico, los grandes herbívoros silvestres y los servicios ambientales del paisaje rural productivo, asimismo el plan muestra las amenazas a estos enfoques, los cuales corresponden a inseguridad jurídica en la tenencia de la tierra, extracción ilegal de madera y la cacería, estos tres tienen una valoración alta. Considerando el enfoque de la evaluación de riesgo, es relevante la extracción ilegal de madera, en la cual se discurren como factores contribuyentes, o sucesos iniciales los siguientes factores (Consejo Nacional de Áreas de Conservación, 2019):

- Crimen organizado, narco-madereros
- Blanqueo de madera
- Falta de denuncia por miedo a represalias por fuga de información
- Debilidad institucional para aplicar la normativa respectiva
- Burocracias y altos costos de acceso a la legalidad para la producción forestal
- Baja participación y compromiso de actores locales
- Grandes consumidores de madera
- Baja competitividad y rentabilidad del bosque como alternativa de uso del suelo
- Alto valor comercial de las especies forestales
- Productos con poco valor agregado
- Conflictos por tierra sin dueño

Corredor biológico

Un corredor biológico corresponde a espacio geográfico definido para el uso humano que tiene la función de conectar dos o más áreas importantes de biodiversidad o ecosistemas, para así permitir el intercambio genético de flora y fauna, y asegurar el desarrollo sostenible. El patrimonio genético que conservan los ecosistemas es el elemento clave para la resiliencia y es la base para garantizar el bienestar actual y futuro. En este caso, el corredor biológico interconecta el Parque Nacional Corcovado, la Reserva Forestal Golfo Dulce y el Humedal Nacional Térraba-Sierpe, de modo que su funcionamiento es sumamente importante pues se trata de áreas silvestres de actividad biológica intensa.

Según se determina en el Programa Nacional de Corredores Biológicos creado en el 2006, estas zonas son declaradas de interés público, y estable a los comités locales como los espacios de articulación y participación para su gestión, en los que se espera la participación de representantes del SINAC, otras instituciones gubernamentales, gobiernos locales, organizaciones de base y no gubernamentales, representantes del sector productivo y privado, con el fin de definir estrategias para la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad y los recursos naturales.

A continuación, en la Figura 26 se muestra el corredor biológico y su intervención en el escenario de exposición.

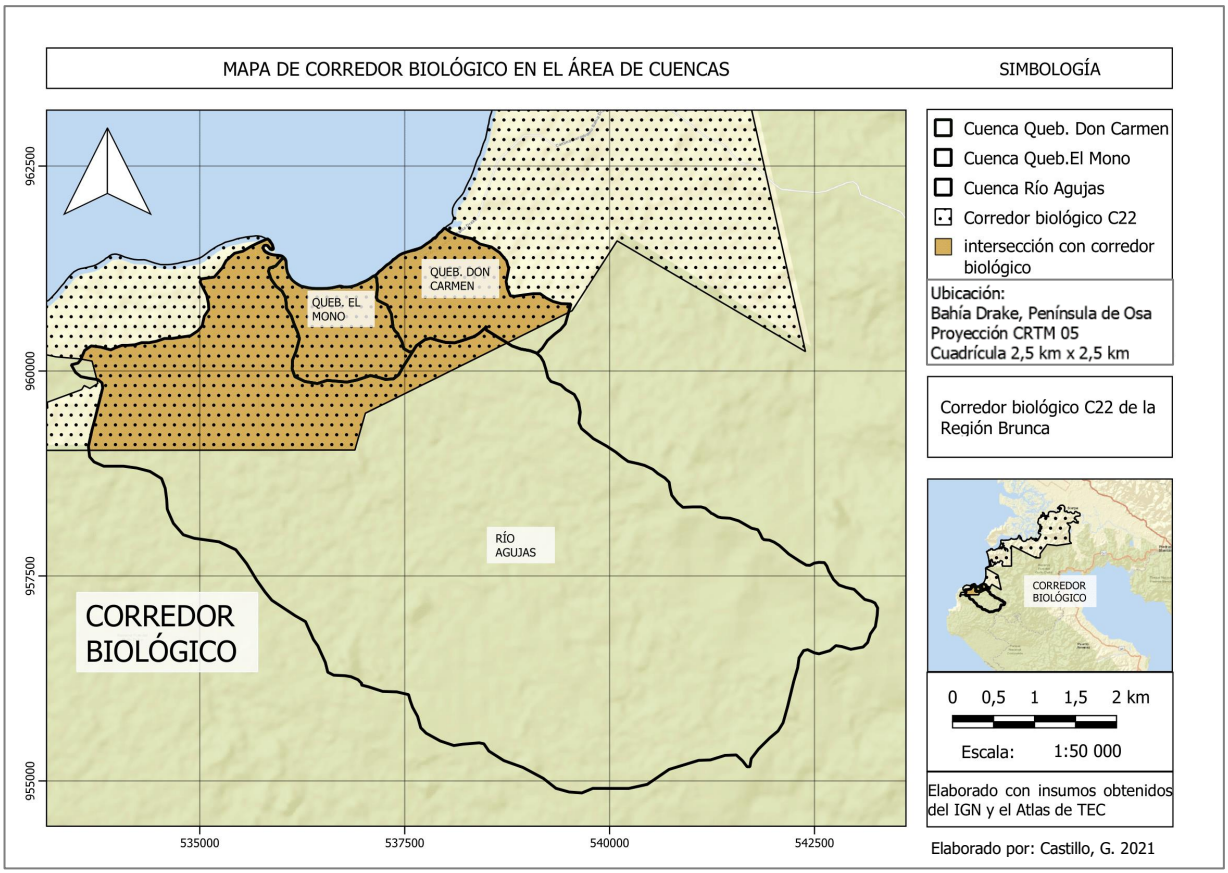


Figura 27. Corredor biológico en el escenario de exposición

Como se puede observar en la figura anterior, el corredor biológico cubre prácticamente en su totalidad la cuenca de las quebradas de playa Colorada, así como la parte baja de la cuenca del río Agujas. La presencia y ubicación del corredor biológico es beneficioso, principalmente para los habitantes de Agujitas, pues este engloba el principal centro poblacional de Bahía Drake, y busca fortalecer la articulación entre sus actores en favor de la conservación del medio ambiente y el desarrollo sostenible (Sancho, 2021).

3.3 Información territorial

En el siguiente apartado se presenta la información territorial de interés para la evaluación del escenario de exposición, en el que se considera factores climáticos, tipo de suelo y aspectos socioeconómicos.

3.3.1 Aspectos climáticos

La información climatológica es de suma importancia para en la determinación de los riesgos ambientales, no obstante, es poca la información disponible que sea específica de la zona de estudio.

Zonas de vida

Las zonas de vida de Holdridge se definen como conjuntos de asociaciones vegetales de ecosistemas que comparten características semejantes como rangos de temperatura, precipitación y humedad, de manera que permiten definir divisiones balanceadas de los parámetros climáticos para agruparlas. En Costa Rica se definieron 12 zonas de vida o formaciones vegetales distribuidas en pisos altitudinales, que son: basal, premontano, montano bajo, montano y subalpino. Esta delimitación es muy utilizada para la descripción de zonas con poca información meteorológica disponible, como es el caso del área de estudio.

En el escenario de exposición se presenta tres zonas de vida diferentes, aunque se tiene el predomino casi total del Bosque muy húmedo tropical y la influencia por cercanía del Bosque muy húmedo premontano de transición a basal presente en la costa, y el Bosque muy húmedo de transición de premontano en la parte alta de la cuenca del río Agujas (Quesada, 2007). En la siguiente Figura 28 se presenta la distribución espacial de las zonas de vida, según los datos del Sistema Nacional de Información Territorial para su última actualización en el 2008.

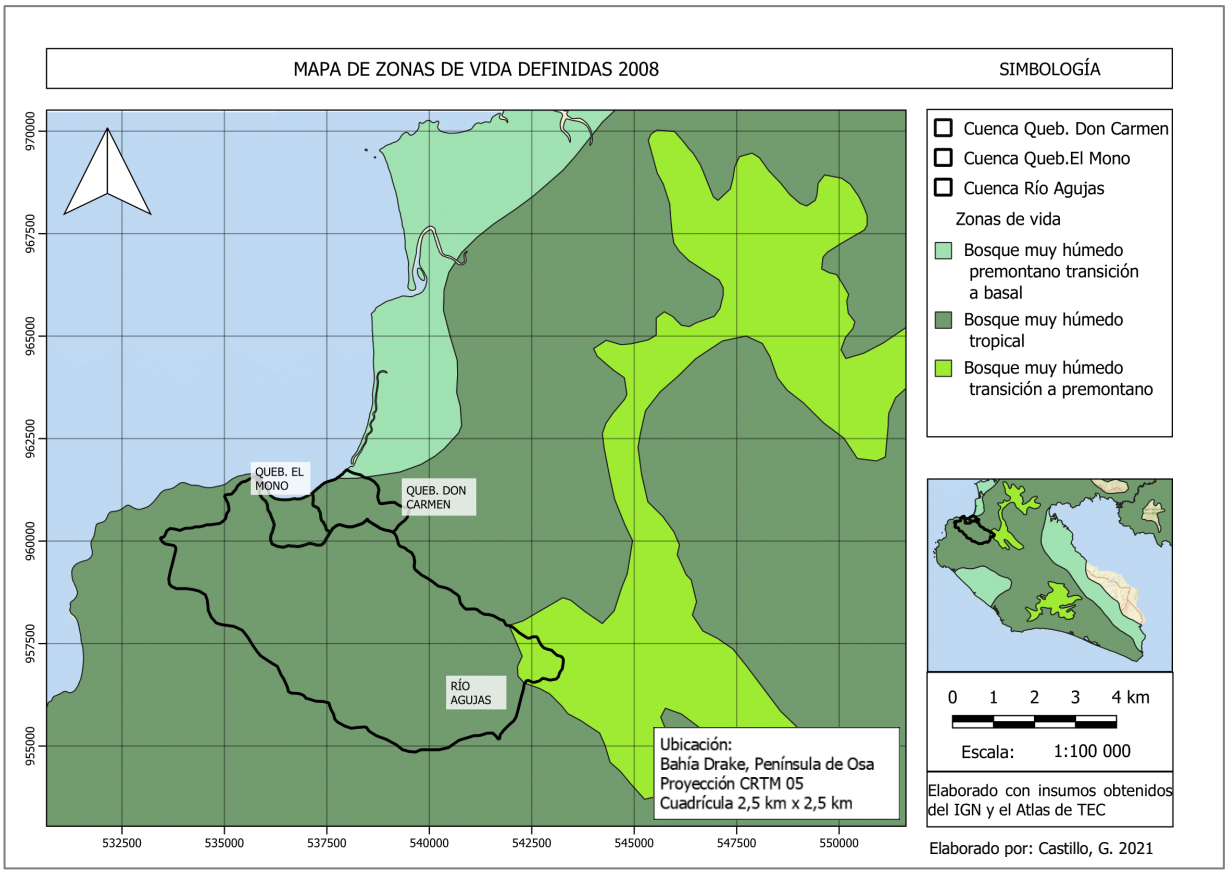


Figura 28. Zonas de vida que influyen en el escenario de exposición

Tal y como se presenta en la figura anterior, la zona de Bosque muy húmedo predomina en el escenario de exposición, así como en la parte central de la península, no obstante, se consideran las otras zonas mencionadas por su cercanía. En el siguiente Cuadro 17 se muestran los valores respectivos de cada zona.

Cuadro 17. Zonas de vida que influyen en el escenario de exposición

Nombre	Código de zona	Piso altitudinal	Bio-temperatura (°C)	Precipitación (mm)
Bosque muy húmedo premontano	bmh-P6	Premontano	18-24	2000 - 4000
Bosque muy húmedo tropical	bmh-T	Basal	24-30	4000 - 8000
Bosque muy húmedo tropical transición a premontano	bmh-T12	Basal	24-30	4000 - 8000

Fuente: (SNIT, 2021)

De modo que, según se presenta en el Cuadro 17 se espera en su mayoría el predomino de temperaturas entre los 24°C y 30°C, con precipitaciones entre los 4000 mm a 8000 mm anuales, aunque este es un rango bastante amplio. Luego, para la cuenca de las quebradas de playa Colorada es de esperar la influencia de la zona Bosque muy húmedo premontano, por lo que se puede esperar temperaturas menores, así como menor precipitación. Mientras que para la otra zona de Bosque muy húmedo tropical transición a premontano se encuentra en el mismo piso altitudinal, por lo que los valores esperados son los mismos.

Datos climáticos del IMN

El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) tiene estaciones meteorológicas a lo largo del país, las cuales miden distintos parámetros, tales como temperatura ambiental, precipitación, días promedio de lluvia, entre otros, dependiendo de las características y equipamiento de la estación. A continuación, se presenta la ubicación de las estaciones meteorológicas en la zona del Pacífico Sur del país, como se puede observar existen 3 estaciones cercanas al escenario de exposición.

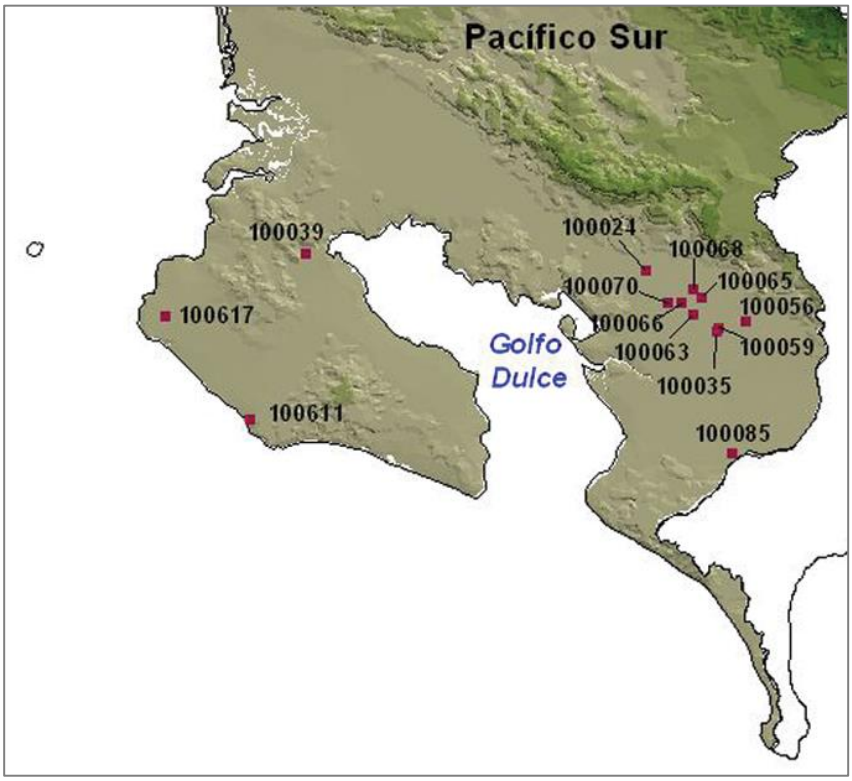


Figura 29. Ubicación de estaciones meteorológicas del IMN
Fuente: (IMN, 2021)

Dado que, como se muestra en la Figura 29, no hay estaciones propiamente en el área del proyecto, se utilizaron los mapas climatológicos generados por el IMN, en los que se presentan isoyetas e isotermas, así como valores de promedio de días de lluvia como producto de la interpolación de los datos obtenidos por las estaciones existentes. De modo que, se obtuvieron los siguientes valores anuales para el área de estudio.

Cuadro 18. Parámetros meteorológicos anuales del IMN

Valor	Temperatura (°C)	Promedio de días con lluvia	Precitación (mm)
Mínimo	22-24	-	-
Promedio	26-28	200-250	4000 - 5000
Máximo	30- 32	-	-

Fuente: (IMN, 2021)

En el caso de la temperatura se tiene el valor mínimo, el cual se registra en la madrugada o poco antes del amanecer, y presenta variaciones espaciales más suaves que la temperatura máxima y promedio, las temperaturas mínimas más altas del país está en un rango de 22°C a 24°C, como en este caso principalmente para la zona de la cuenca alta del río Agujas. Luego, la temperatura promedio es de 26°C – 28°C, que corresponde a la zona de la costa y las llanuras, los mayores valores de temperatura promedio en el país superan los 28°C. Finalmente, la temperatura máxima es de 30°C – 32°C, estas se registran generalmente 2 o 3 horas después del mediodía, y como es de esperar las isotermas más altas se presentan en las llanuras y costas, como es este el caso, no obstante, en el país se registran temperaturas superiores a los 34°C.

Seguidamente, el día de lluvia se define como aquel con al menos 1 mm o más de lluvia registrada, este parámetro es de suma importancia para aplicaciones en agricultura, transporte y otros. En este caso se tiene un valor de entre 200 y 250 días promedio de lluvia, el cual es el más alto para la zona Pacífico Sur, e indica que en la zona llueve más de mitad de todos los días del año. Finalmente se registra un valor de precitación promedio anual de 4000 mm a 5000 mm, aunado a esto, se determinaron los máximos y mínimos valores de precipitación mensual, con el fin de determinar el comportamiento temporal de la precipitación.

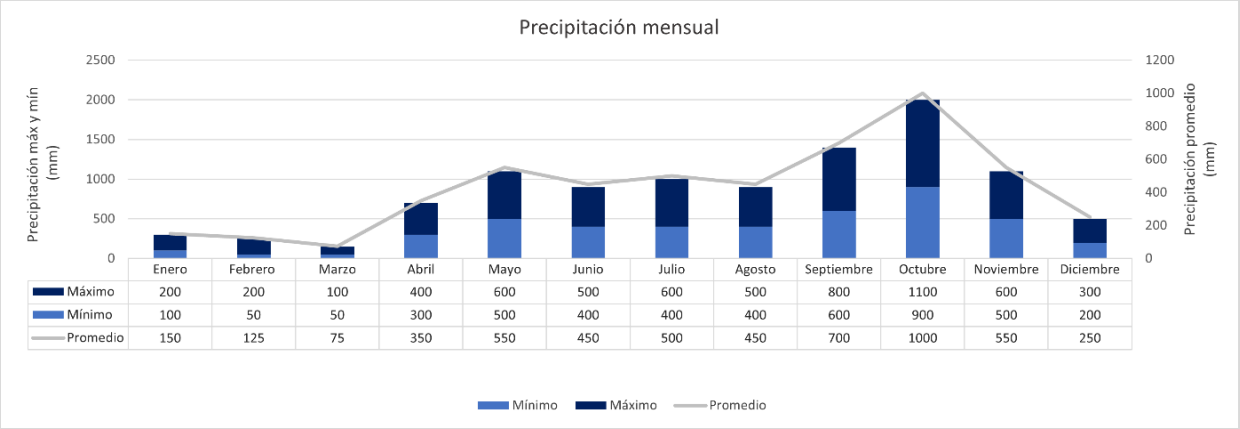


Figura 30. Precipitación mensual en el escenario de exposición

Fuente: (IMN, 2021)

La distribución temporal de la precipitación ha seguido un comportamiento tal y como se muestra en la figura, donde, enero corresponde a un mes de transición de adaptación a menos lluvias, seguidamente febrero corresponde al mes más seco, en el que se esperan precipitaciones en promedio de 50mm en el mes, marzo es un mes de transición a la época lluviosa, por lo que se puede esperar un aumento de lluvias. La época lluviosa completa abarca de abril a octubre, la cual se intensifica de setiembre a octubre en la que ocurren las mayores precipitaciones de la península y del año, respectivamente. Noviembre se define como un mes de transición a la época seca, en el que se da una marca disminución de la precipitación y finalmente diciembre constituye un mes de época seca (IMN, 2021).

Lo cual, se puede apreciar en la Figura 30, en la que además se muestran los valores máximos y mínimos de precipitación esperados, así como la línea de tendencia que define el promedio entre ambos valores.

3.3.2 Tipo de suelo

El tipo de suelo se definió utilizando los datos disponibles en el SNIT, en el que se muestra el tipo de suelo para todo el país según la taxonomía de los suelos, propuesta por el Ministerio de Agricultura de Estados Unidos (USDA, siglas en inglés), y empleada internacionalmente. La clasificación se hace en función de varios parámetros y propiedades del suelo. A continuación, se muestra el correspondiente al área de estudio.

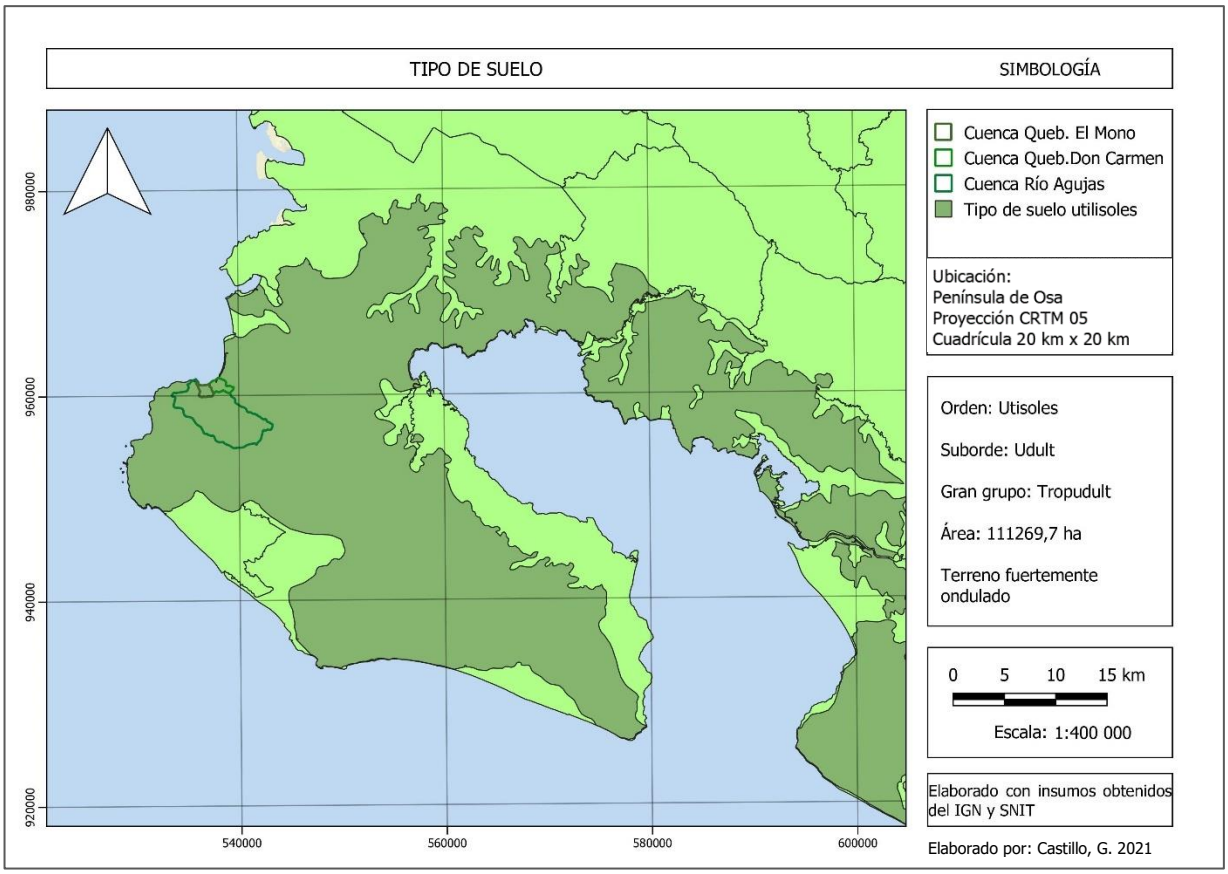


Figura 31. Tipo de suelo para la zona de estudio

Como se puede observar en la Figura 31 la zona de estudio se ubica en un suelo del orden de Ultisoles, los cuales son muy comunes en el país y ocupan cerca del 47 % del territorio nacional. Los ultisoles solo tienen un suborden, el cual es el Udult, los cuales se caracterizan por una topografía accidentada formada bajo condiciones de clima tropical húmedo con abundante precipitación, coloración pardo-rojiza oscuro, y presenta un régimen de humedad údico. Dentro del suborden se reconoce el gran grupo tropudult, el cual se refiere a ultisoles con un horizonte argílico (20 % de aumento en el contenido de arcillas en la sección de control) con menos de un 35 % de saturación de bases en las secciones de control, generalmente bien drenados y relativa baja fertilidad (SNIT, 2020).

Este orden de suelos es uno de los más viejos que se encuentran en el país, su coloración pardo-rojiza o rojiza se debe a la deshidratación o lixiviación del hierro, también se pueden encontrar coloraciones pardo-amarillentas y amarillentas, esto sucede cuando el suelo está deshidratado. Debido a que se encuentra en zonas de alta precipitación, puede suceder que se laven las bases con presencia de sodio, potasio, calcio y magnesio. Además, estos suelos se

caracterizan por tener una alta cantidad de aluminio extraíble, y bajas cantidades de calcio, por lo que se consideran suelos ácidos.

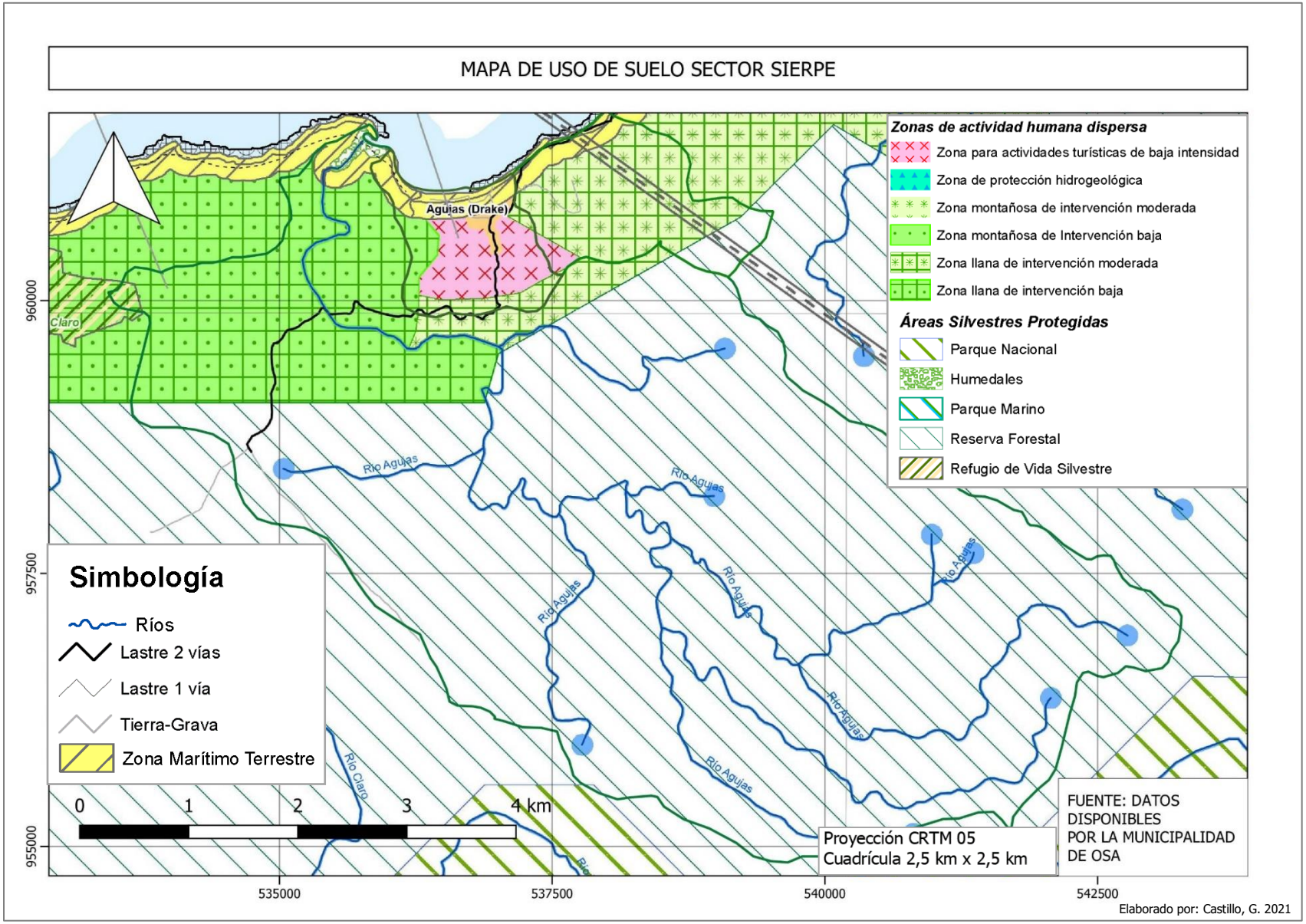
Aunado a esto, este tipo de suelos son las más meteorizados, además de ser más bajos en bases que los Alfisoles, pues como se indicaba tienen menos del 30 % de saturación. Los ultisoles son suelos profundos y bien desarrollados con una transición difusa entre los horizontes, cuentan con texturas finas a muy finas, como es el caso de las arcillas, donde la caolinita y los óxidos de hierro y de aluminio son los de más común ocurrencia. Además, presentan una buena estructuración, lo que hace presenten un drenaje interno adecuado (INTA-COSTA RICA, 2016).

3.3.3 Ordenamiento territorial

La evaluación del ordenamiento territorial se realizó mediante el uso del Reglamento de Zonificación y Uso del Suelo que se encuentra disponible actualmente en el sitio web oficial de la Municipalidad de Osa, así como el Mapa de uso de suelo para el Sector Sierpe.

Inicialmente, en el reglamento se categorizan las zonas urbanas en: centros urbanos, núcleos consolidados, centros de turismo secundario, y núcleos no consolidados, según la cantidad de población, actividades humanas, y capacidad de crecimiento. En este caso el centro de Agujitas, o Drake centro, se considera un centro de turismo secundario, debido a que la población y las actividades que se realizan están relacionadas directamente con el turismo, y son de suma importancia para el cantón por sus atractivos y ubicación estratégica (Municipalidad de Osa, 2021).

Seguidamente, se muestra un extracto del Mapa de uso de suelo del Sector Sierpe, que muestra específicamente el área definida por las cuencas. En este se puede notar que el centro de Agujitas se define una zona de actividades turísticas de baja intensidad, al Este se considera una zona llana de intervención moderada, mientras que, al lado oeste del centro de Agujitas, se considera una zona llana de intensidad baja. Estas zonas están delimitadas al Sur por los límites de la Reserva Forestal Golfo Dulce, y al Norte por la aparición de la Zona marítimo terrestre en la costa. Las características correspondientes se presentan previamente descritas en la sección 1.2.3.


MAPA DE USO DE SUELO SECTOR SIERPE
Zonas de actividad humana dispersa
Zona para actividades turísticas de baja intensidad
Zona de protección hidrogeológica
Zona montañosa de intervención moderada
Zona montañosa de Intervención baja
Zona llana de intervención moderada
Zona llana de intervención baja
Áreas Silvestres Protegidas
Parque Nacional
Humedales
Parque Marino
Reserva Forestal
Refugio de Vida Silvestre
Agujas (Drake)
Claro
Río Agujas
Río Claro
Simbología
Ríos
Lastre 2 vías
Lastre 1 vía
Tierra-Grava
Zona Marítimo Terrestre
0
1
2
3
4 km
Proyección CRTM 05
Cuadrícula 2,5 km x 2,5 km
FUENTE: DATOS DISPONIBLES POR LA MUNICIPALIDAD DE OSA
960000
957500
955000
535000
537500
540000
542500
Elaborado por: Castillo, G. 2021

En la zona de actividades turísticas de baja intensidad el reglamento establece que se permiten todas las actividades de producción agrícolas y pecuarias establecidas por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, además de las siguientes actividades humanas:

- Habitacional
- Balnearios
- Comercio pequeño (Únicamente pulperías)
- Deportivo 1 (Únicamente canchas deportivas)
- Hospedaje turístico 1 (Hotel, Motel turístico, Pensión, Casa de Huéspedes, Vivienda turística, definidos de acuerdo con el Reglamento de las Empresas Hospedaje Turístico del Decreto Ejecutivo No. 11217- MEIC del 25 de febrero de 1980)
- Hospedaje turístico 2 (Albergues y campamentos, definidos de acuerdo con el Reglamento de las Empresas Hospedaje Turístico del Decreto Ejecutivo No. 11217-MEIC del 25 de febrero de 1980 y sus reformas)
- Ecoalbergues (Albergues cuyas características de diseño y de funcionamiento aseguran un uso sostenible de los recursos y un impacto ambiental reducido)
- Infraestructura de soporte para actividades turísticas en zona rural
- Servicios pequeños (Únicamente sodas, cafeterías y restaurantes)
- Telecomunicaciones 1 (Actividades que ofrecen servicios a los vehículos automotores, incluyendo el transporte público: Estacionamientos de vehículos, instalaciones para muelles o atracaderos, terminal de buses, lavaderos de carros y expendios de combustible públicos o privados)

Seguidamente, para la zona llana de intervención moderada se permite el uso agropecuario, adicionalmente las actividades humanas y de infraestructura listadas:

- Habitacional
- Balnearios
- Comercio pequeño (Únicamente pulperías)
- Condominio rural
- Educación avanzada tipo 2 (Se podrán instalar Centros de Investigación Científica solamente si a sugerencia de la Junta Estratégica Territorial hay aprobación del Concejo Municipal)

- Hospedaje turístico 1 (Hotel, Motel turístico, Pensión, Casa de Huéspedes, Vivienda turística, definidos de acuerdo con el Reglamento de las Empresas Hospedaje Turístico del Decreto Ejecutivo No. 11217- MEIC del 25 de febrero de 1980)
- Hospedaje turístico 2 (Albergues y campamentos, definidos de acuerdo con el Reglamento de las Empresas Hospedaje Turístico del Decreto Ejecutivo No. 11217-MEIC del 25 de febrero de 1980 y sus reformas)
- Ecoalbergues (Albergues cuyas características de diseño y de funcionamiento aseguran un uso sostenible de los recursos y un impacto ambiental reducido)
- Infraestructura de soporte para actividades turísticas en zona rural
- Manejo de fauna silvestre
- Servicios pequeños (Únicamente sodas, cafeterías y restaurantes)
- Telecomunicaciones 1 (Actividades que ofrecen servicios a los vehículos automotores, incluyendo el transporte público: Estacionamientos de vehículos, instalaciones para muelles o atracaderos, terminal de buses, lavaderos de carros y expendios de combustible públicos o privados)

En la zona llana de intervención baja se permite el uso agropecuario en aquellas zonas donde la capacidad de uso de suelo declarada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería así lo determinen, además de actividades humanas e infraestructura seguidamente enlistadas:

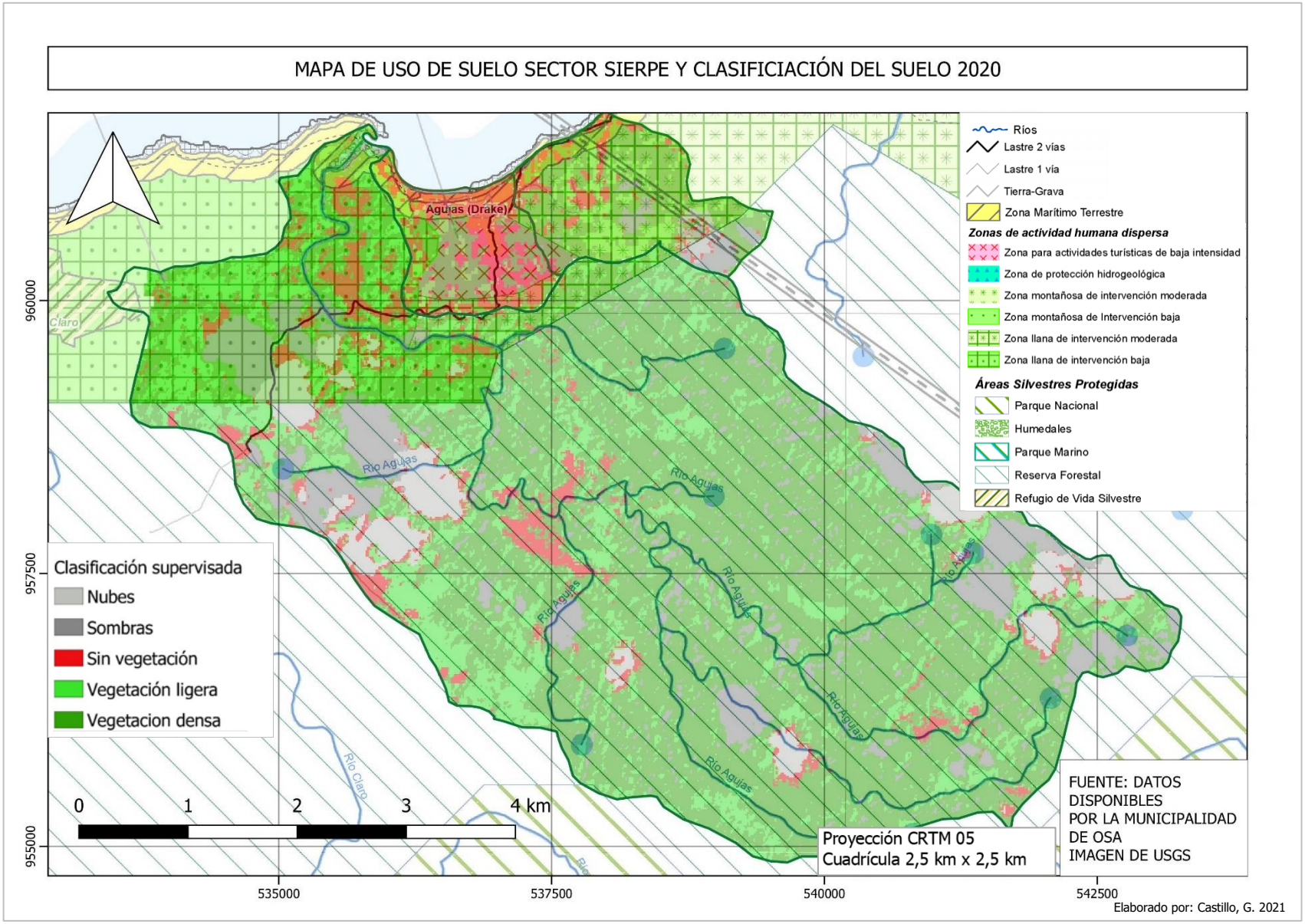
- Habitacional
- Balnearios
- Comercio pequeño (Únicamente pulperías)
- Condominio rural
- Educación avanzada tipo 2 (Se podrán instalar Centros de Investigación Científica solamente si a sugerencia de la Junta Estratégica Territorial hay aprobación del Concejo Municipal)
- Hospedaje turístico 2 (Albergues y campamentos, definidos de acuerdo con el Reglamento de las Empresas Hospedaje Turístico del Decreto Ejecutivo No. 11217-MEIC del 25 de febrero de 1980 y sus reformas)
- Ecoalbergues (Albergues cuyas características de diseño y de funcionamiento aseguran un uso sostenible de los recursos y un impacto ambiental reducido)
- Infraestructura de soporte para actividades turísticas en zona rural

- Manejo de fauna silvestre
- Servicios pequeños (Únicamente sodas, cafeterías y restaurantes)
- Telecomunicaciones 1 (Actividades que ofrecen servicios a los vehículos automotores, incluyendo el transporte público: Estacionamientos de vehículos, instalaciones para muelles o atracaderos, terminal de buses, lavaderos de carros y expendios de combustible públicos o privados

Como se puede notar, el reglamento de zonificación estable limites muy específicos para las actividades que se pueden realizar, además de esto es importante mencionar la gran similitud de las actividades, por lo que en realidad se trata de un rango limitado de actividades disponibles.

Adicionalmente, se hizo una superposición del mapa de zonificación con los resultados de la clasificación supervisada para de las imágenes satelitales del 2020 en ambas cuencas, de modo que sea posible la comparación de lo que se establece, con la situación real de la zona. Los resultados se presentan en la siguiente figura, en la que los sectores donde la cobertura del suelo es suelo desnudo o zona urbana se presenta en tonos rojos (para hacer más fácil su visualización), y se puede notar en el sector de Agujitas que el desarrollo sí se da en la zona en la que se enmarca las actividades turísticas de baja intensidad, no obstante, el desarrollo parece ser entorno a los caminos disponibles y no específicamente en la zona demarcada.

En este sentido es importante observar la posición de la carretera con respecto a la cuenca de las quebradas de playa Colorada, ya que esta pasa sobre la línea divisoria de aguas, y según se puede observar en la figura anterior, esta se trata de una carretera de lastre de dos vías, lo que implica erosión y dispersión de material particular con el viento y con por arrastre de la escorrentía superficial.


MAPA DE USO DE SUELO SECTOR SIERPE Y CLASIFICIACIÓN DEL SUELO 2020
Ríos
Lastre 2 vías
Lastre 1 vía
Tierra-Grava
Zona Marítimo Terrestre
Zonas de actividad humana dispersa
Zona para actividades turísticas de baja intensidad
Zona de protección hidrogeológica
Zona montañosa de intervención moderada
Zona montañosa de Intervención baja
Zona llana de intervención moderada
Zona llana de intervención baja
Áreas Silvestres Protegidas
Parque Nacional
Humedales
Parque Marino
Reserva Forestal
Refugio de Vida Silvestre
Clasificación supervisada
Nubes
Sombras
Sin vegetación
Vegetación ligera
Vegetacion densa
Agujas (Drake)
Río Agujas
Río Claro
0
1
2
3
4 km
Proyección CRTM 05
Cuadrícula 2,5 km x 2,5 km
FUENTE: DATOS DISPONIBLES POR LA MUNICIPALIDAD DE OSA
IMAGEN DE USGS
960000
957500
955000
535000
537500
540000
542500
Elaborado por: Castillo, G. 2021

3.3.4 Aspectos socioeconómicos

Datos poblacionales

Según datos revelados en el 2014 por el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN) dados a través de geoportal del Sistema Nacional de Información territorial (SNIT), la cantidad de población estimada para el cantón de Bahía Drake ha aumentado en términos totales del año 1997 al 2011. El escenario de exposición planteado se encuentra en su totalidad dentro de este distrito (referencia de ubicación en la Figura 1), y corresponde a cerca del 9 % de su área total del distrito. En el siguiente cuadro se presentan los valores de cantidad de población según género.

Cuadro 19. Cantidad de población estimada para el distrito de Bahía Drake

Año	Población		Total
	Mujeres	Hombres	
1997	719	844	1563
2000	814	1000	1814
2011	861	989	1850

Fuente: (SNIT, 2020)

Estos valores corresponden a la totalidad del distrito, de manera que la población que ocupa el escenario es bastante menor. Además de la información de cantidad de población, el MIDEPLAN también puso a disposición la información de los tipos de viviendas que existe en el cantón, de manera que se clasifican en desocupadas, ocupadas y viviendas colectivas, esta última se refiere a casas compartidas entre 2 o más núcleos familiares, los datos se muestran a continuación, en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Tipos de vivienda en el distrito de Bahía Drake

Año	Tipo de vivienda			Total
	Ocupadas	Desocupadas	Colectivas	
2000	454	81	0	535
2011	577	184	2	763

Fuente: (SNIT, 2020)

Con el fin de tener una mayor claridad de la cantidad de población, también se consideraron los datos de la ASADA de Agujitas, que atiende a prácticamente la totalidad de viviendas y servicios del centro de Bahía Drake (quedando por fuera de 6 a 10 viviendas aproximadamente, que tienen fuente de abastecimiento propia), en este caso correspondiente al centro poblacional que se muestra en lo que corresponde a la cuenca de la quebrada El Mono.

De modo que la ASADA señala que para enero 2021 mantiene 204 pajas disponibles, y utilizando los valores del Cuadro 19 y el Cuadro 20, se puede hacer una aproximación de un promedio de ocupación utilizando la cantidad de habitantes entre la cantidad de viviendas ocupadas y viviendas colectivas para el 2011, lo que da como resultado un valor promedio de ocupación de 3,14 personas por vivienda, con lo que se estima que la población esperada es de alrededor de 652 personas, aunque es importante considerar que esta es solo una aproximación que corresponde al centro de Agujitas.

Otro aspecto relevante acerca de la población es la información de su perfil educacional, pues mucha de la educación ambiental puede provenir de los centros educativos. Los indicadores educativos disponibles fueron determinados a partir del censo del 2011. Seguidamente, se muestran datos que corresponde a los años de escolaridad según grupos de edad, con la aclaración de que estos datos corresponden al cantón de Osa completo. Sin embargo, es de esperar un comportamiento similar para Bahía Drake o incluso menor, pues el distro de Sierpe-Drake es de los más rezagados del cantón.

Cuadro 21. Clasificación por rango de edades y años de escolaridad

Años de escolaridad	Rango de edad					
	18 - 35 años		36 - 64 años		65 o más años	
	Cant.	Porc.	Cant.	Porc.	Cant.	Porc.
0 - 6	3804	44,0 %	5709	64,9 %	1821	86,4 %
7 - 12	3852	44,6 %	2164	24,6 %	166	7,9 %
13 - 20	985	11,4 %	924	10,5 %	120	5,7 %
Total	8641	100,0 %	8797	100,0 %	2107	100,0 %

Fuente: (Oficina Regional de Osa, 2016)

Del cuadro anterior se puede notar que el porcentaje de personas que tiene entre 18 y 35 años, y educación superior es de 11,4 %, mientras que el porcentaje de personas con

educación primaria es de 44 %, este patrón se repite en todos los rangos de edades donde es mucho menor el porcentaje de personas con educación superior en comparación con las personas con educación primaria, y esto se acentúa con el aumento del rango de edad, tal que para los rangos de 36 a 64 años y 65 años o más, la gran mayoría solo tiene educación primaria.

Consecuentemente, el Plan de Desarrollo Territorial de Osa indica que para el año del censo 2011, el 5,8 % de la población de Osa era analfabeta, uno de los valores más altos del país, mientras que solo un 6,5 % de la población tiene acceso a educación superior, además solo el 79,3 % de la población entre 5 a 15 años está en educación general básica.

Abastecimiento de agua

De acuerdo con los datos facilitados por la ASADA de Drake es posible determinar los promedios anuales de consumo de agua potable, y con ello, más representativo para este proyecto, la producción de agua residual en cada punto de consumo. En el siguiente mapa se puede observar la ubicación de los abonados de la ASADA de Drake, el listado de usuarios corresponde a un levantamiento de campo realizado por el proyecto de Investigación "Conservación de zonas de alta densidad de biodiversidad, por medio de la caracterización de contaminantes disueltos y sólidos suspendidos en el recurso hídrico e identificación de tecnologías en salud para las zonas costeras, Península de Osa" en marzo 2021, y con colaboración de Carolina Fernández Benavides para su proyecto final de graduación.

En la Figura 32 es importante notar que la mayoría de abonados se ubican en la cuenca de la quebrada El Mono, en la cuenca del río Agujas se ubican cerca de 4 abonados y es sumamente cercano a la cuenca de El Mono, mientras que en la cuenca de la quebrada Don Carmen se ubican algunos en el sector oeste de la cuenca, dada la cercanía al centro de Agujitas, además en el sector este se ubica un abonado en la cuenca Don Carmen y otros cercanos en la cuenca vecina del río Drake. En lo que corresponde a la cuenca de las quebradas de Playa Colorada, es importante que lo presentado corresponde con lo determinado en el estudio de uso del suelo.

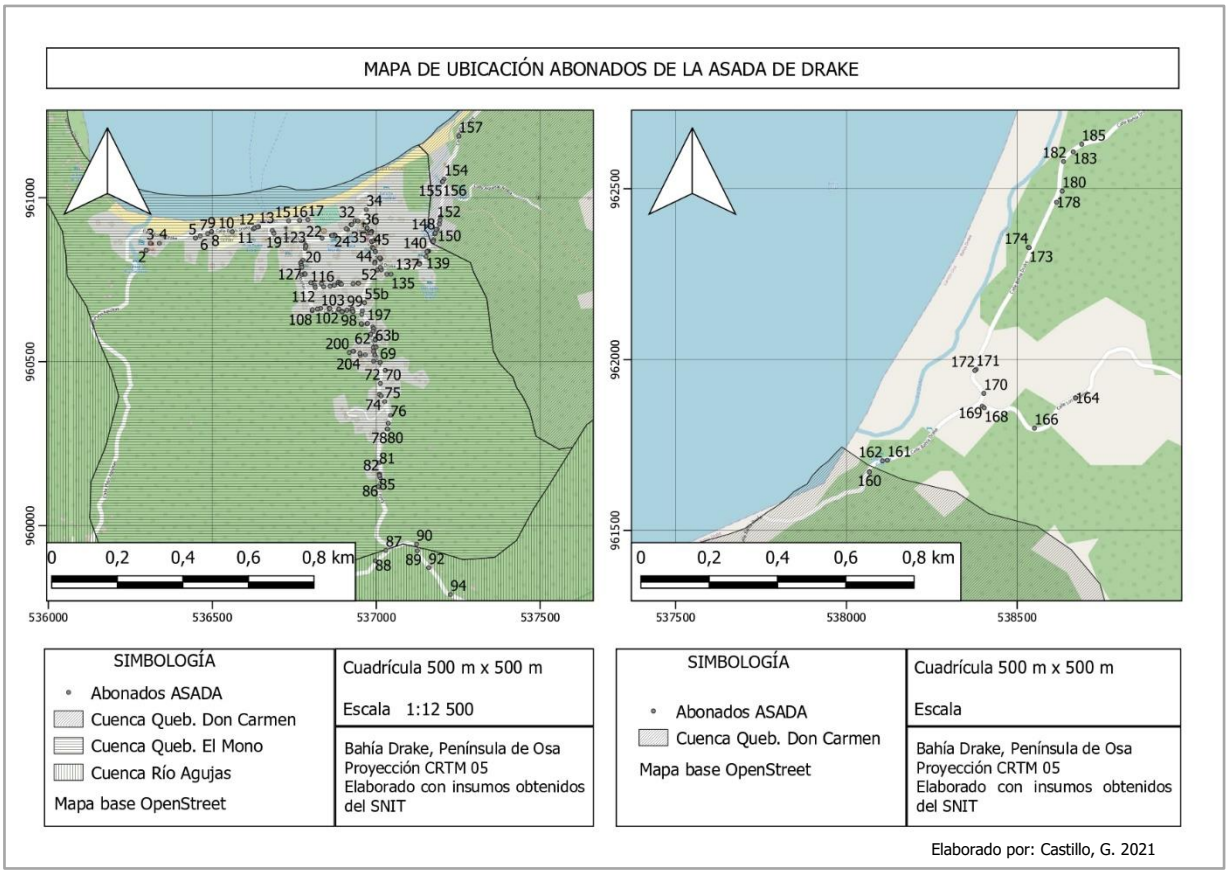


Figura 32. Ubicación de abonados de la ASADA de Drake

Lo señalado anteriormente, es relevante pues permite tener mayor claridad sobre la ubicación de los usuarios y con ello los puntos de producción de aguas residuales. De manera que, a partir de los datos de consumo y suponiendo una generación del 80 % de agua residual se determinaron los promedios de producción mensual de aguas residuales por abonado para los años 2018, 2019 y 2020. Según se puede observar en la siguiente Figura 33, de estos datos no es posible definir un patrón de producción estacional, no obstante, se puede observar una clara disminución en el año 2020, lo cual se puede relacionar con la disminución de las actividades turísticas y los efectos migratorios ocasionados por la emergencia nacional relativa al Covid-19.

Además, se presenta el dato concreto de promedios anuales de generación de aguas residuales de los abonados de la ASADA, que son 22,8 m^3, 27,8 m^3 y 17,9 m^3, para el 2018, 2019 y 2020.

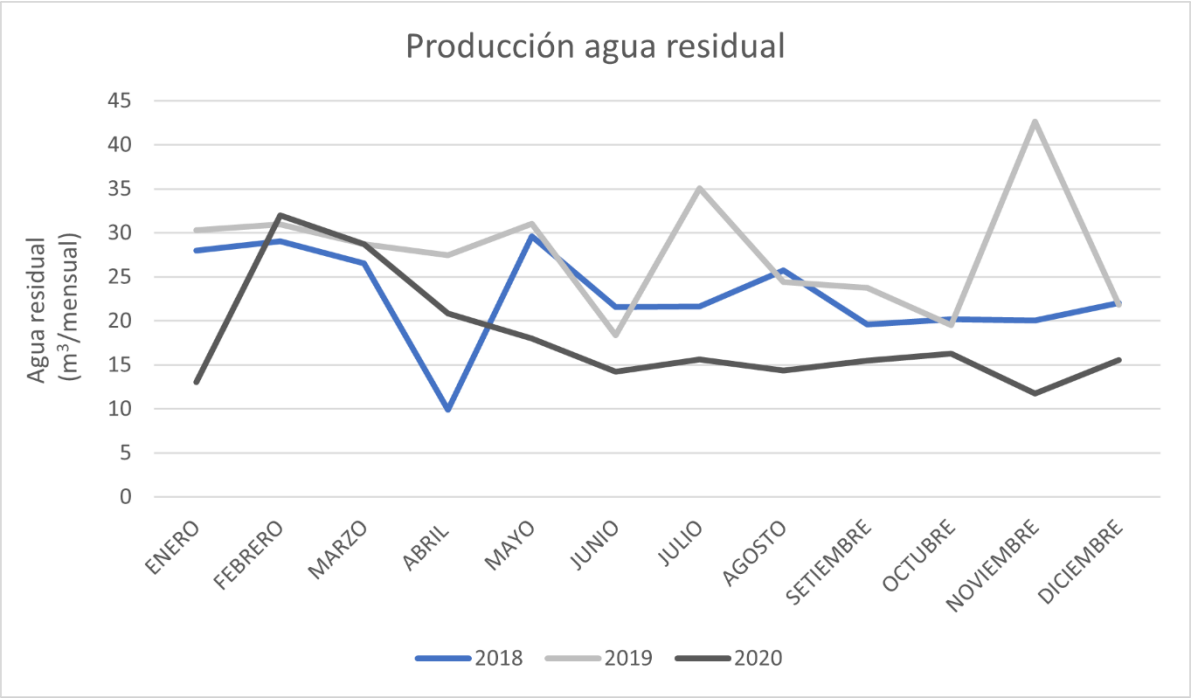


Figura 33. Producción de agua residual para los años 2018,2019 y 2020 en la ASADA de Drake

Índices de Desarrollo Social

En la evaluación de riesgos ambientales es relevante la consideración de la dimensión social, por lo que se utilizan los Índices de Desarrollo Social (IDS) como indicadores de la zona. Los IDS tienen como objetivo contribuir como referentes para la toma de decisiones tanto en el ámbito político como privado, de asignación y reorientación de recursos. El estudio se realiza aproximadamente cada 5 años, la última evaluación se realizó en el 2017, en el cual se consideraron los ejes de economía, participación ciudadana, salud y seguridad, los cuales tienen distintas variables asociadas a cada eje. En la siguiente Figura 34 se presentan las variables empleadas, y como se puede notar, este análisis cubre un espectro amplio.

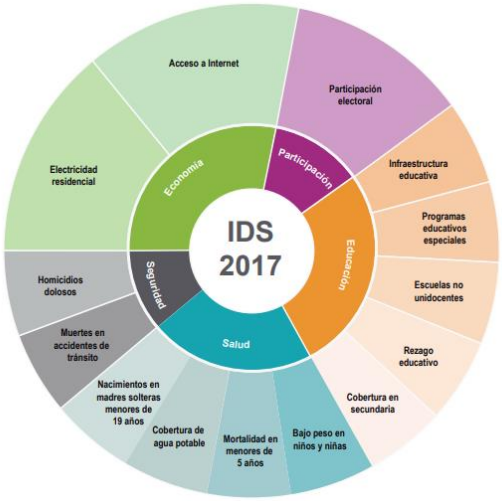


Figura 34. Ejes y variables considerados en la evaluación de índices de desarrollo social (MIDEPLAN, 2021)

En el siguiente Cuadro 22 se muestran los resultados para el distrito de Bahía Drake, a partir del 2013, y previo a esto, del distrito de Sierpe.

Cuadro 22. Resultados de IDS para el distrito de Bahía Drake y de Sierpe

Distrito	Año	Clasificación	IDS	Posición nacional	Quintil
Sierpe	2001	-	32,5	417	I
Sierpe	2007	-	24,3	459	I
Bahía Drake	2013	Bajo	44,5	418	I
Bahía Drake	2017	Muy bajo	42,48	447	I

Del cuadro anterior se observa que, en todos los casos, aun cuando Bahía Drake era parte del distrito de Sierpe, se encuentran en el primer quintil, el cual es el más bajo de desarrollo del país. Aunado a esto, en la posición nacional siempre se está en posiciones por encima de los 400 distritos, de un total de 483 que hay en el país. Además, es importante mencionar que en el estudio del 2013 el distrito de Bahía Drake presentó una ligera mejoría, al evaluarse por aparte, no obstante, no se mantuvo según los datos del 2017.

Actividades productivas

En el PDRT indica que la Península de Osa es una zona tradicionalmente dedicada a la pesca artesanal, la producción de arroz, palma aceitera, así como actividades ganaderas.

Específicamente, en el distrito de Bahía Drake se señalan como principales actividades productivas la pesca artesanal, las plantaciones de palma aceitera, el turismo rural, la ganadería porcina y vacuna, así como actividades comerciales (Instituto de Desarrollo Rural, 2017).

Asimismo, en la evaluación del panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito, realizado por la Universidad de Stanford en el 2013, se plantea que las principales actividades económicas que se realizan en los cantones de estudio están vinculadas a la explotación de los recursos marinos. En la siguiente Figura 35 se presentan el patrón de ubicación de los focos de desarrollo de las actividades productivas.

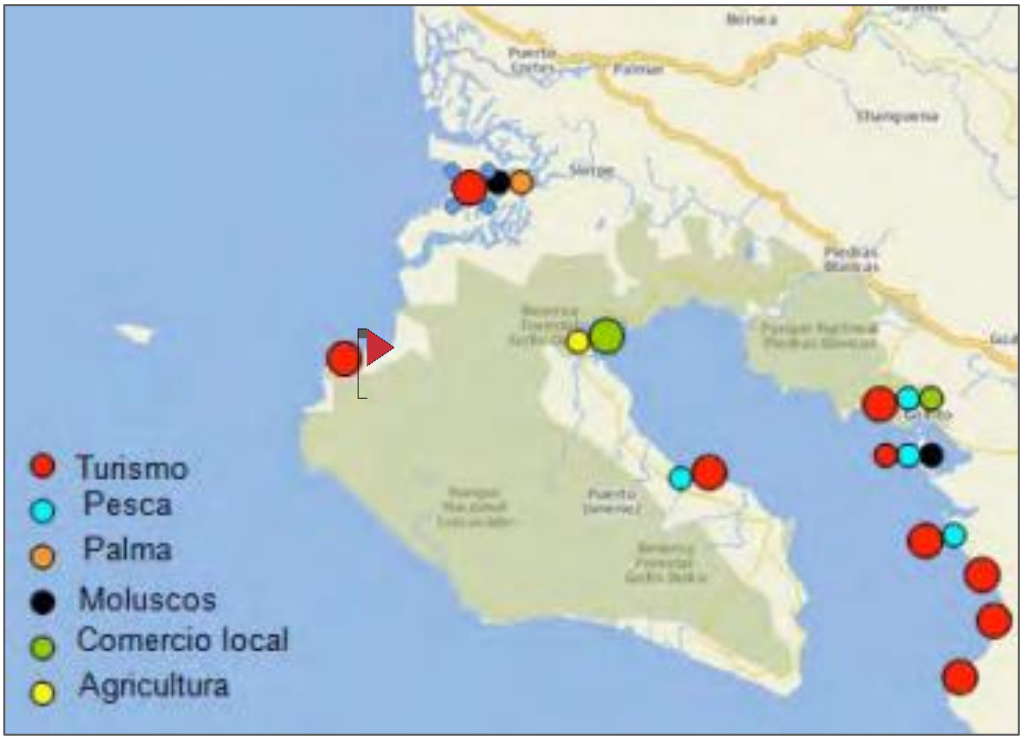


Figura 35. Distribución geográfica de las principales actividades económicas en el Pacífico Sur
Fuente: (Angulo & Román, 2013)

En la figura anterior se puede observar la presencia de uno de los focos justo playa Colorada (ubicación identificada con un banderín rojo), aunado a esto el tamaño del punto rojo marcado, que es del doble de tamaño en comparación con otros, demuestra que esta es una actividad principal, tal que beneficia a más del 50 % de la población. Bahía Drake es uno de los puntos donde inició la actividad turística como actividad económica hace cerca de 20 o 30 años, por

eso es uno de los principales puntos en el cantón de Osa, sin embargo, existen algunas otras actividades más asociadas al sitio en particular.

Concomitantemente con el desarrollo de actividades turísticas, se muestra el aumento de visitantes a el Parque Nacional Corcovado y a la Reserva Biológica Isla del Caño, que son los más cercanos a Bahía Drake. Este comportamiento es una clara señal de la evolución de la actividad turística en la zona, además de su potencial como punto estratégico.

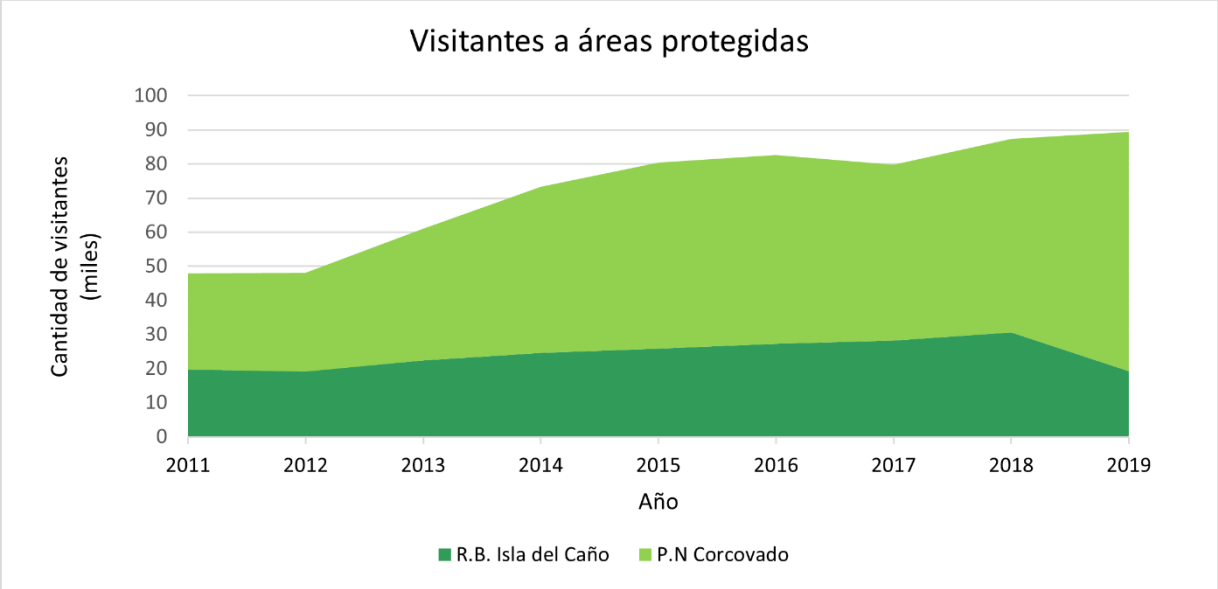


Figura 36. Visitantes a áreas protegidas del sistema SINAC
Fuente: Con base en datos del SINAC, 2021

Seguidamente, el estudio antes mencionado también incluye el desarrollo de actividades agropecuarias, en el cual se establecen la categorización de fincas grandes y pequeñas. Para el cantón de Osa, que es el menor grado de desagregación de datos disponibles, las fincas grandes tienen como cultivos predominantes la palma africana (32 %) y el arroz (26 %), a lo que se le suma la finca camaronera (24 %), actividades ganaderas (13,1 %), y finalmente, sembradíos de plátano (3 %), los otros cultivos son marginales.

Mientras que en las fincas pequeñas la actividad ganadera es la predominante (53 %), seguida en área por la extracción de madera (9,3 %), plantaciones de palma africana (8,5 %), la silvicultura en bosques reforestados (7,8 %), plantaciones de arroz (6,6 %), el resto se ocupa en actividades menos como: cría de cerdos, plátano, maíz, frijol, frutas y raíces, entre otros (Angulo & Román, 2013).

Manejo de residuos sólidos

Las políticas de manejo de residuos sólidos que definan los gobiernos locales son de suma importancia en la evaluación de riesgos ambientales. El gobierno local de Osa presenta en el 2016 su Plan municipal para la gestión integral de los residuos sólidos (GIRS), con un periodo de aplicación del 2016 al 2021. En este documento se señala que el valor de generación de residuos sólidos per cápita en el cantón es de 0,65 kg/hab/día, de manera que para el distrito de Bahía Drake se espera una producción de desechos de cerca de 1 tonelada diaria.

Seguidamente, según datos del censo 2011 la cobertura del servicio de recolección de residuos sólidos se da a un 63,9 % de la población del cantón de Osa, mientras que un 18,3 % indicó que bota los desechos en un hueco o los entierra, un 16, 3 % los queman y un 0,6 % los tiran a un lote baldío, mientras que un 1 % especificó usar otro medio de disposición de los desechos. No obstante, la Municipalidad de Osa indica que para el periodo de 2015 a 2016 se ingresaron 1565 viviendas al servicio de recolección de residuos, por lo que el porcentaje de cobertura aumentó a 81,44 % de las viviendas de las viviendas del cantón.

Actualmente en el distrito de Bahía Drake se cubren las comunidades de Agujitas, Los Planes, Rancho Quemado, Rincón y el Progreso, con una frecuencia de una vez por semana. El cual corresponde a una cobertura de 344 viviendas en total. Los residuos sólidos recolectados son transportados al Vertedero Municipal de Osa, el cual se ubica en una propiedad de 18 hectáreas, y según el plan municipal para la GIRS se plantea convertir en un relleno sanitario.

Actualmente la Municipalidad de Osa recolecta únicamente residuos ordinarios, no obstante, en conjunto con el Ministerio de Salud se realizan campañas para la recolección de residuos no tradicionales. Además, el municipio no realiza recolección de residuos valorizables, aunque está en planeamiento su implementación, y el servicio de aseo de vías y sitios públicos se brinda únicamente en los centros urbanos de los distritos de Cortés, Palmar y Sierpe (Municipalidad de Osa, 2016).

Problemáticas identificadas por PDRT

En el año 2017 el Instituto de Desarrollo Rural publicó el Plan de Desarrollo Rural Territorial (PDRT) del Territorio Península de Osa, para el periodo del 2017 al 2022, el cual tiene como objetivo fomentar el desarrollo sostenible a través de la formulación de un portafolio de

proyecto, de acuerdo con las necesidades y prioridades de los distintos actores sociales. Para esto se procedió a la realización de un diagnóstico del territorio, a partir de talleres realizados en los distritos por medio de una metodología cualitativa que se enfoca en las dimensiones cultural, social, política institucional, económica y ambiental.

El diagnóstico del territorio realizado es un insumo importante en la evaluación de riesgos ambientales, aunque su enfoque es más amplio, de modo que se valoraron las problemáticas identificadas en el PDRT, y a continuación se presentan las que son pertinentes a la evaluación de riesgos de contaminación de cuerpos de agua superficiales (Instituto de Desarrollo Rural, 2017).

1. En la dimensión cultural, también relacionado a la educación e identidad, se tiene las deficiencias de contextualización del currículum educativo en la Península de Osa, a lo que se le atribuyen las siguientes consecuencias:
   - Se carece de sentido de identidad y cultura, y el sistema educativo no refuerza o enseña el potencial que tiene la Península de Osa.
   - La educación ambiental es en su mayoría abordada por ONG`s, las cuales tienen un rango de acción más limitado.
   - La población en general desconoce la historia de la Península de Osa, y su importancia, lo que agrava el problema de poco sentido de pertenencia.
   - No existe un espacio cultural donde se pueda conocer la historia de la Península de Osa.

2. En la dimensión social, concerniente con la organización comunal, existe debilitamiento de las organizaciones para el trabajo en equipo, así como poca articulación de estas, esto produce las siguientes consecuencias:
   - Poca productividad de las organizaciones existentes.
   - Difícil acceso a fondos públicos para mejora de infraestructura.
   - Perjuicio de las actividades turísticas
   - Se carece de políticas de desarrollo definidas para las comunidades.
   - Bajos índices de desarrollo social.
   - No se aprovecha el recurso humano con interés en capacitarse

3. En la dimensión económica y de desarrollo, se da poco acompañamiento técnico en las áreas de agricultura, ganadería, turismo y oferta de servicios, lo que se ve reflejado de la siguiente manera:
   - Pérdida de negocios.
   - Posible contaminación por desconocimiento en el uso adecuado de productos industriales.
   - Pérdida de productos.
4. También de la dimensión económica y de desarrollo, referente a la infraestructura vial, existe poco o nulo mantenimiento, reparación y construcción de la red vial, lo que se manifiesta de la siguiente forma:
   - Dificultad de movilidad, lo que retrasa las actividades productivas.
   - Contaminación producto de la erosión del terreno.
   - Pérdida de infraestructura existente por la falta de mantenimiento.
   - Afectación en el turismo por el difícil acceso.
   - Problemas relativos a la producción y traslado de productos.

5. En la dimensión ambiental, se tiene la problemática de que no existen o no se aplican adecuadamente políticas ambientales que promuevan el desarrollo sostenible, esto conlleva a problemas tales como:
   - Cacería ilegal.
   - Tala ilegal.
   - Deforestación.
   - Extracción ilegal de oro.
   - Inadecuado manejo de los residuos sólidos.
   - Poco compromiso de los habitantes o ciudadanía para detener la cacería, tala ilegal y mala disposición de los residuos sólidos.

6. Igualmente, en la dimensión ambiental, se da el problema de falta de tratamiento de aguas residuales, lo que produce:
   - Daños a la salud pública.
   - Disminución del turismo.
   - Pérdida de zonas recreativas limpias.
   - Contaminación del medio ambiente.

3.4 Descripción de la visita de campo

En total se realizaron dos visitas de campo, en las que se recorrió los principales centros urbanos de Bahía Drake, además se muestrearon los puntos que se presentan en la Figura 37, para lo cual en la quebrada Don Carmen y El Mono se recorrió sobre el cauce de estas con el fin de conocer mejor sus condiciones.

3.4.1 Cuenca del río Agujas

En la cuenca del río Agujas, se visitaron los diferentes puntos del río muestreados, la comunidad de Los Planes (solo el sector este pertenece a la cuenca), y el camino hacia la Estación de Los Planes del Parque Nacional Corcovado. En este recorrido realizado en la primera visita no se visualizaron residuos sólidos en las orillas de calle, ni en los ríos, aunque las calles son de lastre y presentan gran cantidad de material fino suelto, e incluso se nota la erosión pluvial, asimismo, no se visualizaron descargas de aguas residuales directas al río o a la orilla de la calle en las zonas visitadas. La densidad poblacional es baja, y las casas se caracterizan por estar separadas unas con otras por zonas verdes de aproximadamente 50 m o más.

A continuación, se presentan las imágenes tomadas en el punto de muestreo RA 1 y RA 2 (según el Cuadro 27), además de las características que le corresponden a cada una. Por condiciones climáticas no fue posible tener una fotografía del punto de muestreo de RA 3, que corresponde al punto en la desembocadura, no obstante, se trata de un río ancho de muy poca profundidad, cerca de los 15 cm, en las márgenes había pastizales con animales de pastoreo.

Cuadro 23. Características de los puntos de muestreo del río Agujas

Descripción	Fotografía
Punto de muestreo RA2 Río aproximadamente 20 m de ancho Poca profundidad cerca de 30 cm Coraza de grava en diámetro pequeño cerca 10mm Presencia de vegetación en las márgenes	 Julio 2019
Punto de muestreo RA 1 Poca profundidad cerca de 50cm en puntos más profundos Presencia de piedras de mayor tamaño, y acumulación de finos Presencia de playones en las márgenes del río en sectores específicos	 Febrero 2020

3.4.2 Cuenca de las quebradas de playa Colorada

En la cuenca de las quebradas de playa Colorada se recorrió el centro poblacional y sus alrededores, asimismo el cauce de las quebradas El Mono y Don Carmen en la medida de lo posible, pues estas cruzan el centro de Drake por lo que atraviesan propiedades privadas, lo que dificulta el acceso. En lo que corresponde al centro de Drake, este cuenta con calles de lastre en dos vías, no hay cordón y caño, ni ninguna otra infraestructura en específico para el drenaje de agua pluvial.

En los días de visita se visualizaron diversos residuos sólidos ordinarios dispuestos de forma dispersa en las calles o puntos de reunión, además de puntos específicos con desechos sólidos agrupados para ser recogidos por el camión recolector. Seguidamente, se muestran las imágenes con su respectiva descripción de los cauces de las quebradas Don Carmen y El Mono, respectivamente.

Cuadro 24. Características de la quebrada Don Carmen

Descripción	Fotografía
Punto de muestreo QDC2 Agua de poca profundad cerca de 20 cm Flujo laminar Velocidad de flujo muy baja Presencia de vegetación ligera cerca de las márgenes	 Julio 2020

Punto de muestreo QDC2 Alta concentración de finos y material orgánico de origen vegetal Mal olor al acercase Flujo laminar No se visualiza presencia de vida acuática	 Julio 2020
Aguas arriba de punto RA 2 Presencia de casas en la ribera de la quebrada (cuadro rojo) Disminución considerable de finos en comparación con QDC 2 Vegetación ligera en las márgenes	 Febrero 2020

Erosión pluvial de la calle de lastre sobre el puente de paso sobre la quebrada Pérdida de lastre y contaminación del agua Interrupción del flujo natural de la quebrada	 Febrero 2020
Punto aguas debajo de QDC 1 Profundidades bajas cerca de 10 cm Presencia de vegetación en las márgenes El agua no presenta olor	 Febrero 2020

Cuadro 25. Características de la quebrada El Mono

Descripción	Fotografía
Punto de muestreo QEM 2 Quebrada muy profunda con fuerte color Fuerte mal olor Presencia de vegetación en los márgenes Intrusión de material orgánico de origen vegetal	 Julio 2019
Margen de la quebrada cerca del punto de muestreo QEM 1 Presencia de vertidos de aguas residuales Erosión pluvial Algunos desechos de construcción Punto de muestro en propiedad privada	 Julio 2019

Estado de calle aledaña a la quebrada Erosión pluvial y arrastre de material Carencia de infraestructura	 Julio 2019

Además de la descripción del estado de las quebradas y algunos aspectos que puedan ser de interés, se muestran condiciones de riesgo ambiental presentes en la cuenca de las quebradas de playa Colorada, según las visitas de campo.

Cuadro 26. Condiciones de riesgo encontradas en la cuenca de las quebradas de playa Colorada

Descripción	Fotografía
Estructura de toma de agua con prevista para unirse a la quebrada Margen de la quebrada El Mono Algunos desechos ordinarios en los alrededores de la toma	 Julio 2019

Estructura de toma de agua en la margen de la quebrada El Mono	
Estructura de toma de agua junto a la naciente de la quebrada El Mono	Julio 2019

Tubo para vertido de aguas residuales que se dirige a la quebrada El Mono Vegetación ligera en las márgenes de la quebrada	 Julio 2019
Muestra de vertido de aguas grises directo a la calle Malos olores Daño a la vegetación cercana y al paisaje Foto tomada en Agujitas centro	 Julio 2019

Muestra de vertido de aguas grises a la calle Acumulación del agua en la calle, lo que produce malos olores Foto tomada en Agujitas centro	 Julio 2019
Presencia de tanque séptico en la ribera de la quebrada Don Carmen	 Julio 2019

3.5 Resultados de muestreos de calidad del agua

3.5.1 Pruebas realizadas

En el presente apartado se muestran los resultados de las pruebas de calidad de agua realizadas, las que pretenden demostrar de manera puntual las condiciones encontradas en las vistas en junio 2019 y febrero 2020. A continuación, se exponen los puntos que fueron muestreados en cada uno de los afluentes considerados.

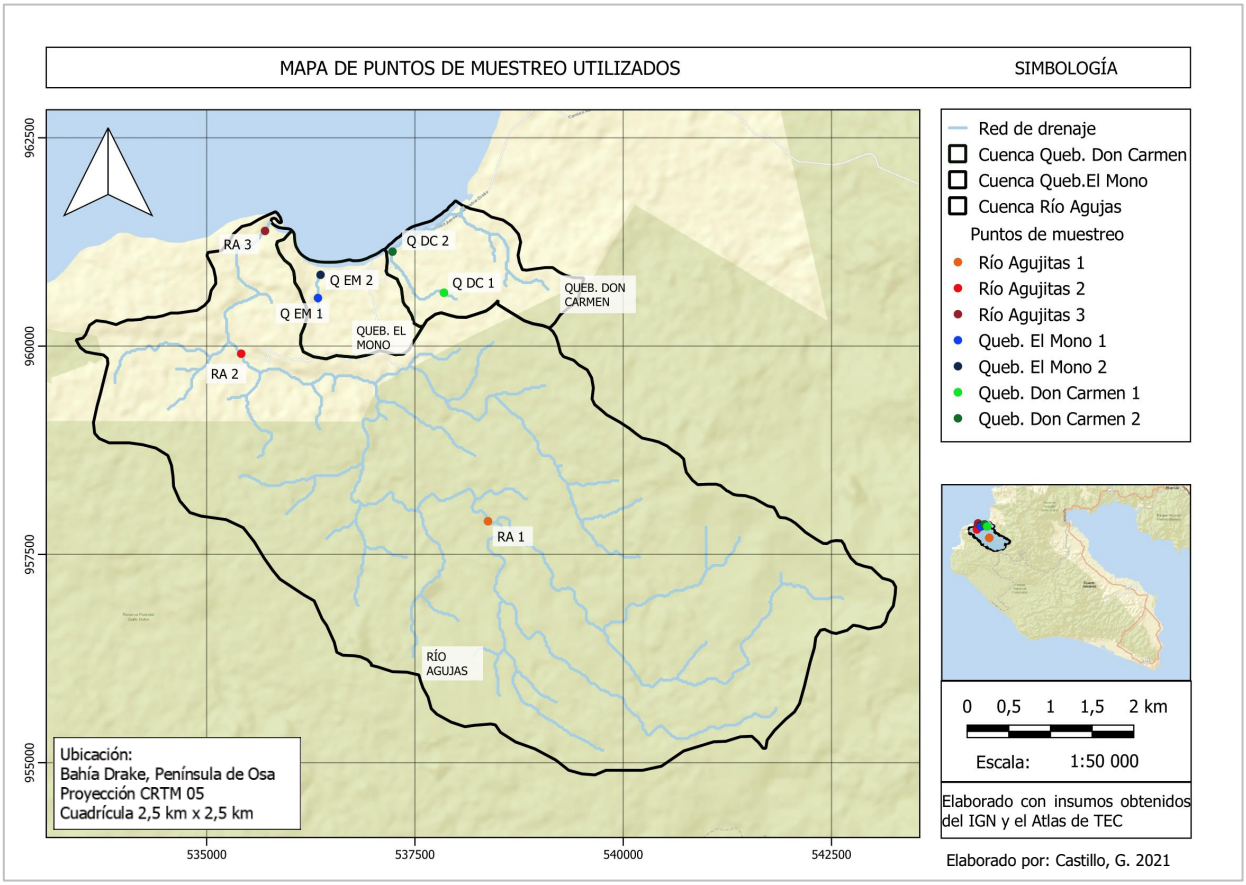


Figura 37. Ubicación de los puntos de muestreo definidos

Aunado a esto, en el siguiente Cuadro 27 se muestra la referencia de los códigos utilizados para cada uno de los puntos muestreados tal y como se presenta en la figura anterior, los cuales se utilizan en el resto del apartado. Asimismo, se incluyen las respectivas coordenadas *x* y *y* en el sistema CRTM05 de cada uno de los puntos.

Cuadro 27. Ubicación de los puntos de muestreo definidos

Cuerpo de agua	Ubicación en la cuenca	Nombre	Coordenada x	Coordenada y
Río Agujas	Alta	RA1	538385,5	957895,7
Río Agujas	Media	RA2	535728,3	961374,3
Río Agujas	Baja	RA3	535418,7	959913,2
Quebrada Don Carmen	Alta	QDC1	537849,9	960645,9
Quebrada Don Carmen	Baja	QDC2	537222,2	961129,6
Quebrada El Mono	Alta	QEM1	536339,5	960441,2
Quebrada El Mono	Baja	QEM2	536394,7	960857,8

Los muestreos realizados abarcan las pruebas fisicoquímicas que fueron realizadas in situ, además de la valoración de nutrientes, turbiedad y color, alcalinidad, DQO Y DBO, sólidos totales en el agua, y finalmente pruebas microbiológicas, realizadas en laboratorio. Además, se incluyen los resultados de las pruebas realizadas en el río Agujas por el proyecto de "Conservación de zonas de alta densidad de biodiversidad, por medio de la caracterización de contaminantes disueltos y sólidos suspendidos en el recurso hídrico e identificación de tecnologías en salud para las zonas costeras, Península de Osa" en febrero de 2019, las cuales comparten los mismos puntos de muestreo.

Es importante mencionar que en los resultados no se muestran valores para QEM1 en la gira de febrero 2020, debido a que no fue posible tomar esa muestra, dado que para ingresar a la zona se debe pasar por propiedad privada y la autorización de ingreso fue denegada a diferencia de la vez en julio 2019.

Dado que ambas cuencas son exorreicas, para los puntos cercanos a la desembocadura de estas se considera la influencia de la marea según los horarios de muestreo y su proximidad con la hora a la que se da la marea alta y baja. A continuación, se presentan los resultados correspondientes.

Cuadro 28. Influencia de las mareas en los puntos cercanos a las desembocaduras

Punto de muestreo	Día muestreo	Hora	Marea alta	Marea baja
RA 3	12/2/2019	14:00:00	07:12:00	13:23:00
RA 3	24/7/2019	15:40:00	07:20:00	13:40:00
RA 3	10/2/2020	17:25:00	15:36:00	09:22:00
QEM 2	24/7/2019	02:30:00	07:20:00	13:40:00
QEM 2	12/2/2020	10:30:00	04:38:00	10:49:00
QDC 2	24/7/2019	02:30:00	07:20:00	13:40:00
QDC 2	12/2/2020	11:30:00	04:38:00	10:49:00

Como se puede notar del cuadro anterior, para los muestreos realizados en el río Agujas en febrero y julio del 2019 la medición se realizó cerca de la bajamar, mientras que en el muestreo de febrero del 2020 se realizó cerca de dos horas de la pleamar por lo que es de esperar la influencia de la marea en el muestreo. Seguidamente, todos los muestreos realizados en las quebradas son en un rango cercano a una hora previa o posterior al punto de marea baja. En adicción se presentan los resultados correspondientes a la medición de salinidad del agua.

Cuadro 29. Resultados de salinidad medidos en campo

Punto de muestreo	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020
	Salinidad (Sal)		
QEM 1	-	0*	-
QEM 2	-	21,3	20,15
QDC 1	-	0,5	0*
QDC 2	-	0*	19,3
RA 1	0,7	0*	0,0
RA 2	0,9	0*	0,1
RA 3	0,1	0*	10,0

* Se asume un valor de 0 Sal debido a que la medición de conductividad era menor a 1000 -µS/cm

Los resultados muestran una clara tendencia de aparición de los valores más altos de salinidad en los puntos de las desembocaduras, en el caso de las quebradas esto sucede a pesar de que los muestreos son en bajamar.

Seguidamente, se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos y de nutrientes en los Cuadro 30 y Cuadro 31, respectivamente.

Cuadro 30. Resultados de parámetros fisicoquímicos medidos en campo

Punto de muestreo	Febrero 2019	Junio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Junio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Junio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Junio 2019	Febrero 2020
	pH			SDT (mg/l)			Conductividad (µS/cm)			Temperatura (°C)		
QEM 1	-	7,46	-	-	435,1	-	-	353	-	-	28,4	-
QEM 2	-	7,88	7,27	-	494,7	162,5	-	2062	33040	-	27,5	31,1
QDC 1	-	7,71	5,62	-	250	31	-	1588,7	63	-	27,9	26,5
QDC 2	-	7,34	6,55	-	438,3	156,4	-	346,1	31280	-	29,6	30,7
RA 1	6,80	6,49	7,86	732	24,0	111,0	1457	33	221	25,0	25,5	27,2
RA 2	7,13	7,12	7,82	840	28,0	127,0	1790	55	254	26,0	26,5	27,6
RA 3	8,00	5,47	7,40	13,5	31,0	*	28,9	52	*	26,1	26,8	31,0

*Valor de conductividad medido en campo no es concordante con el de salinidad

Cuadro 31. Resultados de nutrientes nitrato, nitrito, nitrógeno amoniacal y fósforo

Punto de muestreo	Julio 2019	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020
	Nitrato (mg/l)		Nitrito (mg/l)		Nitrógeno Amoniacal (mg/l)		Fósforo (mg/l)	
QEM 1	0,1	-	0,001	-	0	-	0,55	-
QEM 2	0,5	0,3	0,006	0,007	0,03	0,08	0,34	0,54
QDC 1	0,2	0,1	0,007	0,004	0,02	0,02	0,51	0,62
QDC 2	0,4	0,2	0,008	0,011	0,03	0,09	0,3	0,68
RA 1	0,1	0,01	0,001	0,002	0	0	0,13	0,21
RA 2	0,1	0,01	0,008	0,001	0	0	0,16	0,41
RA 3	0	0,01	0,002	0,006	0	0,23	0,28	0,46

En lo que corresponde a los parámetros fisicoquímicos, primero se evalúa el valor de pH, el cual según la EPA se recomienda mantener en el orden de 6,5 a 8,5, aunque la vida acuática puede desarrollarse en un rango de 5,0 a 9,0. Para el caso de la quebrada El Mono los valores se mantienen cercanos a 7 para ambas campaña de muestreo, en el caso de la quebrada Don Carmen se observa una clara diminución del pH entre julio 2019 y febrero 2020, lo cual llama la atención, no obstante se requieren más estudios para tener conclusiones. Finalmente, para el río Agujas se puede observar dos resultados fuera del rango permitido, ambos en el punto de muestreo de RA 3, correspondientes a 8 en febrero 2020 y 5,47 en junio 2020, en este caso llama la atención el cambio de pH que se da en menos de 6 meses.

Seguidamente, en lo que respecta el parámetro de SDT se espera un valor normal en el rango desde los 20 mg/L hasta los 1000 mg/L. En este caso en lo que respecta a las quebradas de playa Colorada los valores se encuentran en ese rango, y para ambas quebradas se muestra la misma tendencia de disminución de una campaña de muestreo a la otra. Aunado a esto, los valores obtenidos para QEM 2 en ambos casos y el de QDC 2 en febrero 2020 se presentan de forma simbólica, pero no son tomados en cuenta debido a la alta salinidad de la muestra, lo que señala con el tono rojo. En lo que respecta al río Agujas, los resultados del muestreo de febrero 2019 RA 1 y RA 2 son valores altos para tener en cuenta debido a que no se tiene influencia de mareas o intrusión salina; para el resto de las muestras se tienen valores menores a los 150 mg/L, igualmente se presenta en tono rojo los resultados afectados por la salinidad, además de que se debe considerar la influencia de la marea en la muestra de febrero 2020 en RA 3.

El siguiente parámetro está estrechamente ligado con el anterior, y corresponde a la conductividad eléctrica del agua, el cual, asimismo se relaciona directamente con la temperatura. En este caso, similarmente se presentan en rojo las muestras con altos valores de salinidad, de modo que fuera de estos valores, los restantes están por debajo del valor de 1000 -µS/cm recomendado por la EPA, con excepción del resultado de QDC 1 en julio 2019, el cual llama la atención debido a que al ser cuenca era de esperar un valor menor.

En el caso de la temperatura, es importante notar que los valores son predominante alto, superiores a los 25 °C, con un máximo en febrero 2020 en RA 3 de 31,0 °C. Lo cual es influyente debido a que entre mayor es la temperatura más se potencia la proliferación de microorganismos, se afecta el olor, sabor, color, además de que se disminuye la capacidad de

absorción del oxígeno, lo que es sumamente dañino para la biota, no obstante, altas temperaturas también pueden propiciar procesos microbiológicos que contribuyan al consumo de materia orgánica en los cuerpos de agua. Aunado a esto, es relevante observar que en todos los casos la temperatura es mayor para el muestro de febrero 2020, en comparación con el de julio 2019, a lo que se pueden atribuir distintos factores como el clima, la hora de muestreo, entre otros, aunque esto no ocurre con el muestreo de febrero 2019.

En lo que respecta al muestreo de nutrientes, según la EPA en el caso del nitrato valores superiores a 50 mg/L representan una amenaza para la salud pública, no obstante, los resultados indican que en ninguno de los casos se supera el valor de 1 mg/L, en este caso es importante observar que para las quebradas de playa Colorada, tanto en el muestreo de julio como de febrero, los resultados aumentan aguas abajo, situación que no sucede en el río Agujas en el que en todas las mediciones se indica un resultado de 0,1 mg/L. En lo que corresponde al nitrito, la EPA señala que un valor superior a los 0,03 mg/L es un indicador de contaminación por aguas residuales, por lo que en este caso los resultados indican que no hay contaminación por agua residual reciente, en el cuadro se señala en rojo el valor de 0,011 mg/L correspondiente a QDC 2 en febrero 2020, en este caso para las quebradas también se puede observar el aumento que se da entre el punto 1 y 2 en todos los casos.

El siguiente parámetro evaluado es el nitrógeno amoniacal, el cual la EPA señala que el rango óptimo para el desarrollo de la vida acuática es entre 0,005 mg/L y 0,025 mg/L, mientras que valores superiores a 0,1 mg/L indican contaminación por aguas residuales. En lo que respecta a las quebradas se observa que solo en el caso de QDC 1 los valores se encuentran en el rango óptimo para la vida acuática, y que para QDC 2 en febrero el valor corresponde a 0,09 mg/L muy cercano a 0,1 mg/L, lo mismo sucede para QEM 2, es importante notar que los valores aumentan de 1 a 2. En lo que corresponde al río Agujas, se tiene que los valores son iguales a 0,000 mg/L, o al menos no detectables por el colorímetro con sensibilidad 0,000 mg/L, con excepción del valor para febrero 2020 que es de 0,23 mg/L, el cual es un indicador de contaminación por aguas residuales recientemente.

El último nutriente medido es el fósforo, el cual la EPA recomienda para cuerpos de agua superficiales un valor de 0,062 mg/L máximo, principalmente con el fin de reducir la probabilidad de eutrofización. Sin embargo, en todos los casos los valores resultantes son

mucho mayores, que van de un rango de 0,13 mg/L a 0,68 mg/L, lo cual es relevante en la evaluación de riesgos.

Seguidamente, se presentan los resultados de los muestreos de turbiedad y color, los cuales fueron medidos en laboratorio.

Cuadro 32. Resultados de turbiedad y color el agua

Punto de muestreo	Julio 2019	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020
	Turbiedad (UNT)		Color (Pt-Co)	
QEM 1	1,51	-	43	-
QEM 2	3,46	7,66	28	43
QDC 1	1,8	3,52	30	39
QDC 2	6,19	8,97	41	42
RA 1	2,9	1,22	3	2
RA 2	4,46	1,23	5	8
RA 3	3,25	1,15	4	3

Según el cuadro anterior, en lo que respecta a la turbiedad los valores en general se encuentran en un rango de 1,15 UNT a 8,97 UNT, el Reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficial sugiere que para actividades recreativas se mantenga en un valor menor o igual a 25 mg/L, de manera que en este caso los resultados están muy por debajo de este valor. Para la turbiedad, en lo que respecta a las quebradas de la cuenca de playa Colorada, es importante observar un ligero aumento de los puntos 1 a el punto 2. Mientras que para el río Agujas, los valores son aún más bajos, pues no superan el valor de 4,46 UNT, lo que demuestra poca presencia de material particulado en suspensión aunado a las bajas velocidades de flujo en el río, y que este río se caracteriza por la presencia de una coraza de grava de poco tamaño en el fondo.

Seguidamente, se presentan los valores del color aparente del agua, en este caso para las quebradas de playa Colorada se presentan en un rango de valores de 28 Pt-Co a 43 Pt-Co, mientras que para el río Agujas los valores se encuentran en un rango de 2 Pt-Co a 8 Pt-Co. De acuerdo con el mismo reglamento anterior, para asegurar la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas, se recomienda que el color esté en un rango de 2,5 Pt-Co a 10 Pt-Co, de manera que los resultados para el río Agujas son muy positivos, mientras

que para las quebrabas de la cuenca de playa Colorada demuestra la presencia de moléculas complejas derivadas de la materia orgánica.

A continuación, se agregan los resultados correspondientes a la alcalinidad del agua, mediante las pruebas realizadas en el LIA.

Cuadro 33. Resultados de alcalinidad

Punto de muestreo	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020
	Alcalinidad (mg/L)		
QEM 1	-	163,2	-
QEM 2	-	108,8	142,7
QDC 1	-	58,8	61,9
QDC 2	-	72,8	76,7
RA 1	127,69	48,4	48,9
RA 2	140,89	47,2	42,8
RA 3	150,6	63,2	53,0

Los valores de alcalinidad para el río Agujas se presentan en un rango aproximadamente de 49 mg/L a 150 mg/L, lo que es esperable en condiciones de áreas húmedas y suelos lixiviados, lo cual es similar a los resultados que muestran de la quebrada Don Carmen donde los valores se encuentran en un rango de 58,8 mg/L a 76,7 mg/L, con la diferencia de que en este caso los valores aumentan del punto 1 al 2 en ambos casos, en este caso es relevante que para ninguno de los casos se presentan valores altos de pH, y por el contrario para QDC 2 en febrero 2020 el valor de pH es muy bajo con 5,62 (Cuadro 30), por lo que no se establece relación con procesos de eutrofización para este caso.

Aunado a lo anterior, los resultados de la quebrada El Mono son levemente mayores que los de la quebrada Don Carmen, y se muestran en un rango de 108, 8 mg/L a 163,8 mg/L. Lo cual puede atribuirse a distintos factores como un cambio en el tipo de suelo o el aumento de presencia de carbonos e hidróxidos. Para este caso los valores de pH no superan el valor de 8, por lo que no hay concentración de iones hidroxilos producto del consumo del dióxido de carbono del agua.

A continuación, se muestran los resultados que corresponden a las pruebas de DQO, DBO $_{(5,20)}$ y OD, en los Cuadro 34 y Cuadro 35, respectivamente.

Cuadro 34. Resultados de demanda bioquímica y química de oxígeno

Punto de muestreo	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020	Febrero 2020	Julio 2019	Febrero 2020
	DQO (mg/L)			DBO $_{(5,20)}$ (mg/L)		
QEM 1	-	6	-	-	1,8	-
QEM 2	-	17	21	-	5,2	14,2
QDC 1	-	2	2	-	2,8	12
QDC 2	-	12	18	-	4,2	14,8
RA 1	7	20	20	12,6	0,0*	12,0
RA 2	20	32	32	0,1	-	9,3
RA 3	20	270	270	12	19,8	0,0*

*Los valores indicados como 0 mg/L se identifican como No detectable

Cuadro 35. Resultados de oxígeno en el agua (medido en campo)

Punto de muestreo	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020
	OD (%)			OD (ppm)		
QEM 1	-	51,3	-	-	4,39	-
QEM 2	-	38,2	50,4	-	3,17	3,3
QDC 1	-	53,8	49,1	-	4,12	3,93
QDC 2	-	12,3	18,2	-	1,03	1,22
RA 1	50	63,5	87,2	4,12	5,25	6,87
RA 2	50	66,3	91,4	4,05	5,77	7,17
RA 3	-	39,4	93	-	3,13	5,21

*Los valores indicados como 0 mg/L se identifican como No detectable

Los resultados de DBO $_{(5,20)}$, DQO y OD son muy importantes en la determinación de la calidad del agua, pues son un indicador de indicios de contaminación por materia orgánica. De modo que, los valores recomendados por la EPA son para el DBO $_{(5,20)}$ valores menos a 3 mg/L, mientras que valores mayores a 5 mg/L son indicativos de contaminación. Seguidamente, para la DQO un valor máximo de 20 mg/L, y valores mayores de 25 mg/L son indicadores de

contaminación, por último, para el OD el valor mínimo recomendado es de 5 mg/L. En consideración con lo anterior, se evalúan los resultados obtenidos, con la debida aclaración de que los valores mostrados en rojo en el Cuadro 34, corresponden a las muestras en las que los valores de salinidad fueron distintos de cero, por lo que puede darse una alteración del proceso producto de la intervención por cloruros.

Inicialmente, los valores de DQO para las quebradas de la cuenca de playa Colorada son bajos, en un rango de 2 mg/L a 12 mg/L, los cuales corresponden a estándares de cuerpos de agua que permiten la conservación del equilibrio natural, según el Reglamento para la evaluación y clasificación de calidad de cuerpos de agua superficial. En lo que corresponde al río Agujas, los valores reportados son mayores, para los cuales el valor de RA 1 de 20 mg/L es un resultado positivo tal y como se muestra anteriormente, luego el valor de 32 mg/L es un indicador de contaminación por materia orgánica en el agua, mientras que el valor de 270 mg/L correspondiente a RA 3 en julio 2019 es un valor alto pero en una muestra con salinidad de 10 mg/L, además de la interferencia de las marea, además el hecho de la $DBO_{(5,20)}$ sea 0,0 mg/L para esa misma muestra los hace contradictorios e indica una posible alteración del resultado.

En continuidad con lo anterior, los valores de $DBO_{(5,20)}$ indicados para las quebradas se presentan en un rango de 1,8 mg/L a 14,8 mg/L, los cuales muestran distintos escenarios de contaminación, no obstante, para todos los casos el valor aumenta del punto 1 al punto 2, por lo que se indica la adición de contaminantes a lo largo del cuerpo de agua que afectan su calidad. Para la campaña de julio 2019 solo el valor de QEM 2 supera el valor de 5 mg/L, al que se le atribuye indicios de contaminación por aguas residuales, mientras que para febrero 2020 todas las muestras indican valores superiores a 12 mg/L. En lo que respecta al río Agujas, en el muestreo de julio 2019, para el punto 1 el valor fue 0,0 mg/L, para el 2 no se obtuvo el resultado, mientras que para el 3 el resultado fue de 19,8 mg/L, el cual es indicador contaminación, mientras que, en la prueba de febrero 2020, para el punto 3 el resultado fue de 0,0 mg/L, y en los puntos 1 y 2 los valores son superiores a 5 mg/L, asimismo los puntos 1 y 3 de las muestras de febrero 2019.

En lo que respecta a los resultados del OD en el agua, en lo que corresponde al río Agujas, los valores de RA 1 y RA 2 de febrero 2019 y el valor de RA 3 en julio 2019 son inferiores a 5 mg/L, lo que indica que en los demás puntos se tienen condiciones estables para la conservación de la vida acuática. Los valores de las quebradas de la cuenca de playa Colorada

en todos los casos los valores son inferiores a 5 mg/L, no obstante, los valores de QEM 2 para febrero y julio son cercanos a 3 mg/L, valor límite para considerar que se pone en riesgo la biota, mientras que para QDC 2, igualmente en julio y febrero, los valores son cercano a 1 mg/L, los cuales son valores alarmantes baja calidad de agua y amenaza a la vida acuática, lo cual está igualmente ligado la temperatura del agua (Cuadro 30). De los valores de OD se puede intuir la baja capacidad de aireación de las quebradas por la disminución en la concentración, lo cual es esperable debido a las condiciones de baja velocidad de flujo y poca pendiente, definidas por la topografía de la zona.

En seguida se muestran los resultados de los sólidos totales del agua.

Cuadro 36. Resultados de sólidos totales en el agua

Punto de muestreo	Julio 2019	Febrero 2020
	Sólidos totales (mg/l)	
QEM 1	200	-
QEM 2	190	205
QDC 1	140	190
QDC 2	240	390
RA 1	70	50
RA 2	70	60
RA 3	90	30

Como se puede observar del cuadro anterior, los valores de sólidos totales muestran de forma comparativa, una mayor presencia en las quebradas Don Carmen y El Mono que en el río Agujas, además para la quebrada Don Carmen los valores aumentan significativamente del punto 1 al 2. Este valor es un indicador de la materia orgánica e inorgánica presente en el agua.

Finalmente, se presentan los resultados de los resultados de los muestreos microbiológicos, los cuales fueron realizados en el INISA.

Cuadro 37. Resultados de las pruebas microbiológicas

Punto de muestreo	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020	Febrero 2019	Julio 2019	Febrero 2020
	Coliformes fecales (NMP/100ml)			Escherichia coli (NMP/100ml)			Enterococcus faecalis (NMP/100ml)		
QEM 1	-	1700	-	-	**	-	-	920	-
QEM 2	-	2400	>16000	-	2400	16000	-	540	2400
QDC 1	-	1600	700	-	920	540	-	940	2200
QDC 2	-	2400	9200	-	2400	9200	-	3500	9200
RA 1		**	130	-	**	130	-	*	460
RA 2	49*	540	79	33*	540	79		350	170
RA 3	240*	138*	240	240*	**	240		*	920

* Muestras procesada fuera de rango de 24 horas.

** Muestras no procesadas.

En el cuadro anterior presentan los resultados de las pruebas de coliformes fecales, Escherichia Coli y Enterococos fecales o Enterococcus faecalis, los cuales son indicadores de la presencia de patógenos provenientes de desechos fecales humanos y de animales. Inicialmente, para los coliformes fecales el Reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos de agua superficiales indica que el valor máximo aceptable para la realización de actividades recreativas en el agua es de 1000 NMP, el cual en lo que corresponde al resultado de las quebradas de playa Colorada solo en la muestra de febrero 2020 de QDC 1 el valor es menor, en las demás se sobre pasa, este mismo reglamento indica que para que el agua sea utilizable para consumo humano debe no superar un valor de 2000 NMP, el cual es igualmente sobrepasado en la mayoría de las muestras, igualmente para valores superiores a 2000 NMP el agua no puede ser utilizada para abastecimiento de agua en abrevaderos.

Además de esto, es importante notar el aumento que se da de los puntos 1 a los 2 en todos los casos de las quebradas, lo que indica la presencia de contaminantes que afectan la calidad del agua a lo largo del cauce. En lo que respecta al río Agujas los valores son menores a 1000 NPM en todos los casos, el mayor es el de julio 2019 con 540 NMP, lo cual el reglamento antes mencionado establece que el agua puede ser empleada para consumo humano con un tratamiento convencional, y para abastecimiento de agua en abrevaderos sin limitaciones.

En lo que respecta a Escherichia Coli, el cual corresponde al indicador universal de contaminación fecal, y por lo tanto de presencia de patógenos, los resultados son los mismos que para el muestreo de coliformes fecales excepto para las muestras de QEM 2 en febrero 2020 y QDC 1 en febrero 2020 y en julio 2019, en estos tres casos los resultados son menores, pero aún positivos, por lo que se confirma la presencia de contaminación fecal en las quebradas, y en menor medida en el río Agujas.

Por último, el Enterococos es otro indicador de contaminación con materia fecal en los cuerpos de agua, ya sea de origen humano o animal, el cual se caracteriza por ser confiable y sencillo. Para este indicador la EPA recomienda un valor máximo de 200 NMP/100 ml en cuerpos de agua superficiales, en el caso de las quebradas de playa Colorada los valores superan en gran medida este rango, pues se presentan entre 540 NMP hasta 9200 NMP, lo cual representa un riesgo a la salud, aunado a esto en todos los casos igualmente se sigue la tendencia que el valor del punto 2 es mayor que su respectivo punto 1. En lo que respecta al río Agujas, los valores igualmente están fuera de la recomendación de la EPA, excepto por el caso de RA 2 en febrero 2020. El valor de RA 3 en febrero 2020 es máximo registrado y muy fuera del promedio, para lo cual es importante considerar que esta muestra tiene una influencia directa de la pleamar.

Finalmente, en lo que corresponde a la determinación de plaguicidas se toman como referencia los resultados del proyecto de investigación previamente mencionado. En este caso, se cuenta con una muestra simple de agua de mar superficial tomada cerca de la desembocadura del río Agujas el 11 de febrero 2020, e ingresada para su correspondiente análisis el 18 de febrero al Centro de Investigación en Contaminación Ambiental. Los resultados indican que ninguno de los plaguicidas evaluados está presenta en la muestra. En la sección de Anexos se enlistan los plaguicidas muestreados y los correspondientes resultados.

3.5.2 Clasificación de los resultados

La clasificación de los resultados se hace utilizando las metodologías expuestas en el Reglamento para la evaluación y clasificación de los cuerpos de agua superficiales. La primera clasificación se realiza utilizando los parámetros de turbiedad, pH, nitratos, DQO, SDT y coliformes fecales, en la que se le asignan distintos puntajes según el rango de contaminación,

y dependiendo de la calificación obtenida se establece una clasificación de uso y un potencial tratamiento para su recuperación, según se muestra en el Cuadro 2.

El otro método corresponde a el Sistema Holandés de valoración de calidad de cuerpos receptores por codificación de colores, el cual considera las parámetros de porcentaje de saturación del oxígeno (PSO), $DBO_{(5,20)}$ y nitrógeno amoniacal, a partir de esto se le asigna una puntuación que va del 1 al 5 según el nivel de contaminación, al final los resultados se suman y se hace la clasificación como se indica en el Cuadro 1, en el que se puede clasificar como sin contaminación, o contaminación incipiente, moderada, severa y muy severa.

Seguidamente se muestran los resultados de la evaluación de la primera metodología, para los muestreos de julio 2019 y febrero 2020, los cuales se presentan de forma matricial con el fin de establecer de forma más visible la clasificación de cada cuerpo de agua, además de identificar de forma más clara la influencia de cada parámetro en la definición.

Cuadro 38. Evaluación de parámetros de la gira de julio 2019 según el Reglamento para la clasificación de cuerpos de agua superficiales

Parámetros complementarios	Unidades	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Turbiedad	(UNT)	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1 RA 2 RA3				
Potencial de hidrógeno	-	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1 RA 2			RA3	
Nitratos, NO_3	(mg/L)	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1 RA 2 RA3				
Demanda química de oxigeno	(mg/L)	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1		RA 2 RA 3		
Color	(Pt-Co)	RA 1 RA 2 RA 3	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2			
Solidos disueltos	(mg/L)	RA 1 RA 2 RA 3	QEM 1 QEM 2 QDC 1 QDC 2			
Parámetro biológico						
Coliformes fecales	(NMP/ 100ml)		RA 1 RA 2 RA 3	QEM 1 QDC 1	QEM 2 QDC 2	

Cuadro 39. Evaluación de parámetros de la gira de febrero 2020 según el Reglamento para la clasificación de cuerpos de agua superficiales

Parámetros complementarios	Unidades	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Turbiedad	(UNT)	QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1 RA 2 RA 3			*	*
Potencial de hidrógeno	-	QEM 2 RA 1 RA 2 RA 3	QDC 2		QDC 1	*
Nitratos, NO_3	(mg/L)	QEM 2 QDC 1 QDC 2 RA 1 RA 2 RA 3				
Demanda química de oxigeno	(mg/L)	QDC 1 QDC 2 RA 1	QEM 2			RA 2 RA 3
Color	(Pt-Co)	RA 1 RA 2 RA 3	QEM 2 QDC 1 QDC 2			
Solidos disueltos	(mg/L)	QDC 1 QDC 2 RA 1 QEM 2 RA 2 RA 3				
Parámetro biológico						
Coliformes fecales	(NMP/ 100ml)		QDC 1 RA1 RA 2 RA 3			QEM 2 QDC 2

En el Cuadro 38 se muestran los resultados que corresponden a la gira de julio 2019, en el que se presentan los resultados para los tres cuerpos de agua evaluados, el valor de QEM 2 en rojo representa la muestra de DQO en la que hay intrusión salina. En lo que respecta al río Agujas los resultados indican que el punto aguas arriba de RA 1 es el mejor evaluado en clase 2 relativo a la medición de coliformes fecales, mientras que el punto peor evaluado es el más cercano a la desembocadura RA 3 con una valoración de clase 4, debido a la acidez de la muestra.

Seguidamente, para la quebrada El Mono, el punto aguas arriba QEM 1 se clasifica como clase 3, mientras que el punto cercano a la desembocadura QEM 2 se define como clase 4. En este caso el parámetro definitivo en la determinación de la clase es la cantidad de coliformes fecales. En la quebrada Don Carmen, en el punto aguas arriba QDC 1 es de clase 3, el punto cerca de la desembocadura QDC 2 es clase 4, igualmente, en este caso el parámetro determinante son los coliformes fecales. Por lo tanto, para este muestreo las quebradas tienen la misma clasificación según la presente metodología.

En lo que corresponde a el muestreo para febrero 2020 los resultados se presentan en el Cuadro 39, similar al caso anterior los valores en rojo son indicadores de que la muestra de agua indica intrusión salina y para el caso de RA 3 también el efecto de la marea. En el río Agujas en el punto RA 1 es de clase 2 para el cual los parámetros que lo definen son los coliformes fecales, el punto RA 2 y RA 3 se encuentran en clase 3, la cual se determina por la DQO, no obstante, el resultado de RA 3 está marcado por ser una muestra con intrusión salina por lo que la clase asignada es 3, definido por la cantidad de coliformes fecales. En lo que respecta a la quebrada El Mono el punto QEM 2 corresponde a clase 5, de acuerdo con los resultados de coliformes fecales. Mientras que los resultados de la quebrada Don Carmen, en el punto QDC 1 corresponde a clase 4 relativo al valor del potencial de hidrógeno, y el punto QDC 2 es de clase 5, dado el resultado de coliformes fecales.

De acuerdo con la categorización presentada anteriormente, para las muestras RA 1 de febrero y de julio con clase 2, el respectivo reglamento (Cuadro 2), indica que es agua que puede ser utilizada en actividades recreativas de contacto primario y corresponde a una fuente de protección de las comunidades acuáticas, aunque ya no se percibe como una fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas. Seguidamente, los puntos que resultaron en clase 3 que son RA 2 en julio 2019 y RA 3 en febrero 2020, además de QEM 1 y QDC 1 en julio 2019, para las cuales se considera que no es apta para actividades

recreativas de contacto primario, y ya no se considera una fuente de protección para las comunidades acuáticas, además de que no es posible su uso para riego de plantas sin limitantes, ni riego de hortalizas o frutas ingeridas con cáscara.

En adicción, los puntos QEM 2 y QDC 2 de julio 2019, y QDC 1 de febrero 2020, se clasificaron como clase 4, a los cuales en además de las limitaciones que se presentan para el caso anterior de clase 3 se le suman el agua se debe utilizar en el abastecimiento de abrevaderos y actividades pecuarias con limitaciones. Finalmente, para la muestra de RA 3 en julio 2019, RA 2, QEM 2 y QDC 2 en febrero 2020 los resultados indican que es clase 5, la cual es la clase de mayor contaminación que tiene esta metodología, en la que no se recomienda su uso para abastecimiento de actividades industriales en la producción de alimentos ni con tratamiento avanzado, tampoco el uso en abrevaderos, ni actividades pecuarias, además de las limitaciones antes mencionadas.

Concomitantemente, se muestran los resultados de la aplicación del método de clasificación holandés, los cuales se muestran en los Cuadro 40 y Cuadro 41.

Cuadro 40. Resultado de análisis de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores para muestras de julio 2019

Parámetro	QEM 1	QEM 2	QDC 1	QDC 2	RA 1	RA 2	RA 3
PSO (%)	3	4	3	5	3	3	4
DBO (mg/l)	1	2	1	2	2	1	2
$N\text{-}NH^{+4}$ (mg/l)	1	1	1	1	1	1	1
Puntuación	5	7	5	8	6	5	7

Cuadro 41. Resultado de análisis de calidad del agua según el Sistema Holandés de codificación por colores para muestras de febrero 2020

Parámetro	QEM 2	QDC 1	QDC 2	RA 1	RA 2	RA 3
PSO (%)	4	4	5	2	1	1
DBO (mg/L)	4	4	4	4	4	2
$N\text{-}NH^{+4}$ (mg/L)	1	1	1	1	1	1
Puntuación	9	9	10	7	6	4

Como se puede apreciar en los cuadros anteriores, para el muestreo de julio 2019 los resultados de las quebradas El Mono y Don Carmen y del río Agujas aguas arriba, que corresponden a los puntos QEM 1, QDC 1, RA 1 y RA 2, tienen un código verde que indica contaminación incipiente. Mientras que en los puntos cercanos a la desembocadura el código cambia a amarillo, lo que indica contaminación moderada. Esto es relevante, pues demuestra que existen factores contaminantes que afectan la calidad del cuerpo de agua en su recorrido.

Por otra parte, para el muestreo de febrero 2020 los resultados son algo distintos, en este caso el punto medio en el río Agujas y el cercano a la desembocadura, correspondientes a RA 2 y RA 3, presentan contaminación incipiente. Mientras que en los puntos ubicados en la desembocadura de la quebrada El Mono, aguas arriba de la quebrada Don Carmen y del río Agujas, con los códigos QEM 2, QDC 1 y RA 1 están en código amarillo, lo que indica contaminación moderada, además el punto aguas debajo de la quebrada Don Carmen QDC 2 tiene una categorización de contaminación severa, lo que es sumamente negativo, al tratarse de una zona recreativa.

Con la totalidad de los resultados de clasificación de los cuerpos de agua, se hace muy relevante la diferencia que implica utilizar una metodología o la otra, y como los resultados para un mismo punto pueden variar significativamente dependiendo de ello, principalmente relacionado a la incorporación de parámetros como los coliformes fecales y la DQO.

CAPÍTULO 4. EVALUACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES

La evaluación de riesgos ambientales tiene tres etapas, que corresponden al análisis del medio, seguido por la evaluación de los peligros o amenazas identificas, para este caso, según la metodología planteada, se definen como los factores condicionantes a los que se les asigna las respectivas consecuencias en caso de ocurrencia. La última etapa corresponde a la caracterización del riesgo mediante el empleo de una matriz de riesgo.

4.1 Análisis del escenario de exposición

La etapa de análisis de los riesgos inicia con la delimitación y caracterización del escenario de exposición, tal como se muestra en la sección anterior, y la última etapa corresponde al análisis de este. Lo cual corresponde a la consideración de todos los aspectos mencionados en la caracterización con el fin de establecer el listado de sucesos que determinaron el suceso iniciador, así como los escenarios de consecuencias en el cual se incluyen efectos activos y pasivos para tener un espectro más amplio de lo que puede suceder. Dado este enfoque, se utilizó la metodología de análisis por árbol de fallo según se describe en la Figura 4.

La definición de los sucesos iniciadores se hizo mediante el análisis de las fuentes de contaminación por actividades antropogénicas en cuerpos superficiales de agua que normalmente ocurren, lo cual a su vez se contrapuso con las características del medio que definen cuales actividades son representativas del escenario de exposición. De lo cual se definieron:

- Vertido de aguas residuales domésticas
- Contaminación por residuos sólidos
- Contaminación por efectos de procesos de deforestación
- Contaminación relativa a actividades agropecuarias

No se consideró la contaminación por vertido de agua residual especial, debido a que no hay desarrollo de actividades industriales en la zona, y en las actividades agropecuarias se toma en cuenta el vertido de aguas de ganaderías y agricultura. Por la misma razón, no se consideró la contaminación relacionada a actividades de minería y el transporte fluvial.

4.1.1 Árbol de fallo

El primer árbol de fallo que se presenta es del suceso iniciador de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas, para el cual se definieron como sucesos iniciadores 1) la condición de que actualmente no existe un sistema de saneamiento colectivo que pueda recolectar y tratar las aguas residuales, lo que se atribuye principalmente a condiciones de regulación y presupuesto del gobierno local. Aun así, debido a que existen soluciones individuales que puedan estarse utilizando, se considera la posibilidad de que no se utilicen por 2) poca cultura ambiental de entender la importancia de estos elementos o bien por falta de un sentimiento de pertenencia que genere la necesidad de protección de los recursos, lo que se apoya en lo presentado en el INDER en el PDRT del 2017-2022.

Asimismo, también se consideran las fuentes de contaminación que provienen de 3) sistemas de saneamiento individuales que no estén funcionando adecuadamente relativo a pocos controles de diseño u operación, por lo que no cumplen con sus funciones de limpieza, de manera que los efluentes no tienen la calidad de limpieza adecuada, como se pudo observar en las visitas de campo realizadas a la zona. En esta misma línea, el último suceso iniciador que se presenta es el 4) establecimiento de asentamientos informales, debido a que esta es una problemática relacionada a cuando se densifican los centros urbanos de forma acelerada, como es el caso del centro de Drake.

Como se puede observar de la Figura 35 el turismo rural es la principal actividad productiva realizada el Drake, principalmente relacionada a su posición estratégica, y la acumulación de servicios que ofrece, por lo que es de esperar que la población se densifique en este punto, lo cual también se pudo comprobar con el análisis del uso de suelo, aunque es claro que este demuestra un rápido crecimiento del centro de Drake, no así la formalidad de estos, o el uso de sistemas de tratamiento individuales. Otros factores que se suman son los bajos indicadores de desarrollo social, y una gestión floja en términos de planificación urbana.

En lo que corresponde a los escenarios de consecuencias planteados, se establecieron en función de los factores condicionantes, de manera que corresponden a parámetros de calidad del agua que se ven afectados con el vertido de aguas residuales domésticas, para lo cual se utilizó como base lo establecido por el Reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos de agua superficiales y las recomendaciones de la EPA. Los parámetros fueron elegidos en

función de los ensayos de calidad del agua realizados y que a su vez estuviesen ligados como indicadores de contaminación por agua residual doméstica y sus principales consecuencias, de modo que los parámetros de calidad del agua definidos para el cuerpo de agua son el oxígeno disuelto (mg/L), la demanda química de oxígeno (mg/L) y los coliformes fecales (NMP), este último principalmente por su importancia como parámetro microbiológico e indicador de patógenos.

De esta forma se estableció el primer escenario, como las condiciones en las que no se garantice la conservación y protección del agua, el siguiente escenario de consecuencias es más abrumador, en el que la contaminación impide que se realicen actividades recreativas de forma segura, aunado a posibles malos olores que afectan el paisaje, además se ve afectada la vida acuática lo que produce la emigración de algunas especies o su muerte, entre otros. El tercer escenario acumula las consecuencias de los dos anteriores, y se le suma la pérdida de la capacidad del agua para ser utilizada para abrevaderos, para animales vacunos o para riego y una degradación más profunda de la vida acuática.

Aunado a lo anterior, se agregó un escenario de consecuencias que no está ligado a los anteriores, pero su suceso inicial también se relaciona a el vertido de aguas residuales, y es la consolidación de condiciones para el desarrollo de eutrofización en el agua, lo cual se trabajó de esta manera porque en el presente estudio no se contempla la determinación de parámetros como la clorofila, que es necesarios como indicador para los modelos de determinación de eutrofización, por lo que se recomienda su incorporación en futuros estudios. Esta condición se ostenta principalmente el lagos o lagunas, no obstante, las bajas velocidades del cauce pueden igualmente conllevar esta condición, la cual es sumamente perjudicial para la vida acuática, la salud pública, el mantenimiento de espacios para la recreación, entre otros.

Seguidamente, en la Figura 38 se presenta el árbol de fallos para el vertido de agua residual doméstica.

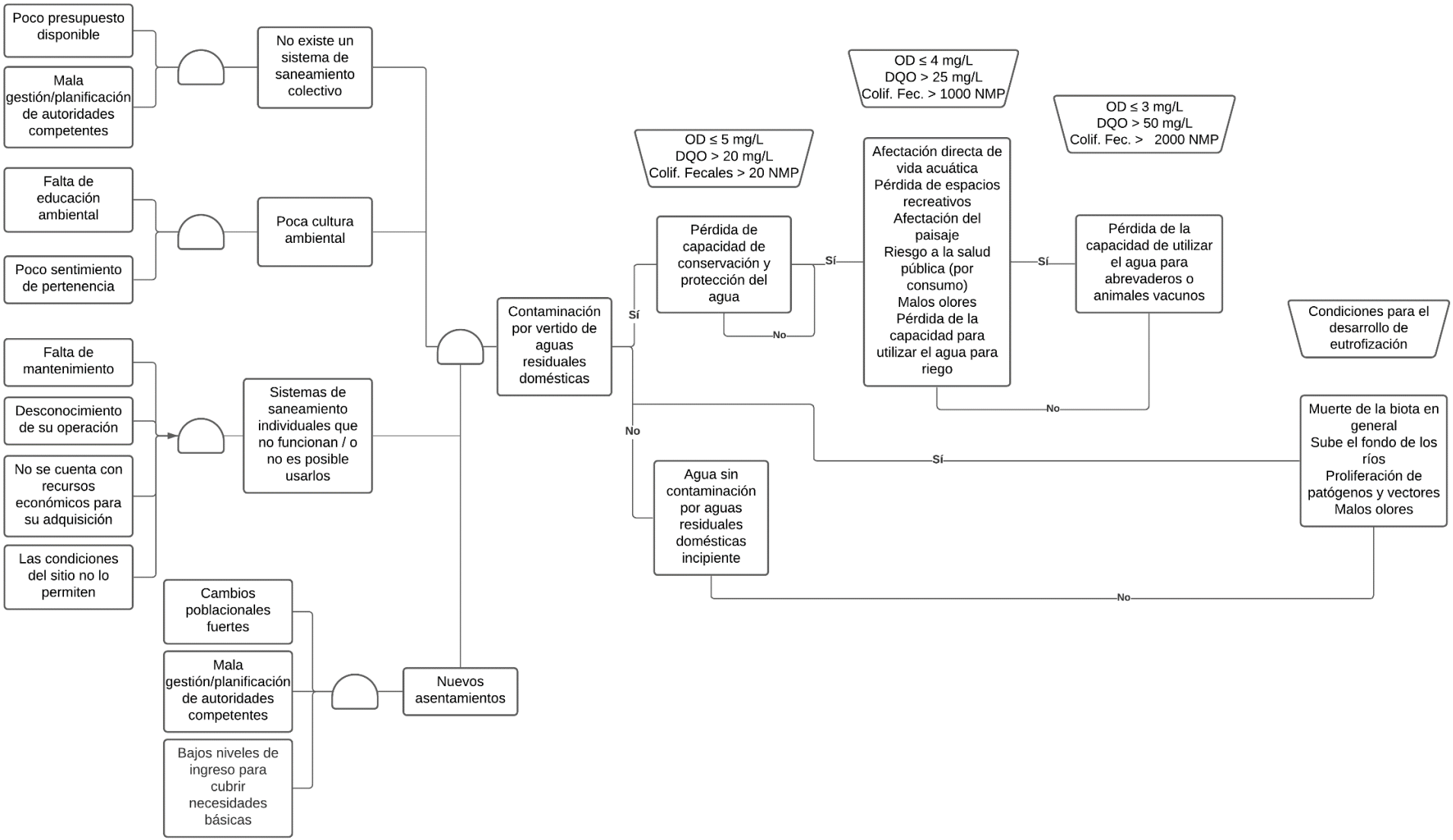


Figura 38. Árbol de fallos para la contaminación por vertidos de aguas residuales domestica

El siguiente árbol de fallo corresponde a la contaminación por residuos sólidos en los cuerpos de agua, para lo cual se definieron tres sucesos iniciales que corresponden a que los 1) residuos llegan a los cuerpos de agua por el arrastre debido a que se encuentran en la superficie por accidente, o por personas con poca educación ambiental o desapego al lugar que decidieron no desecharlos apropiadamente de forma deliberada, así como problemas relativos a la recolección de residuos sólidos, por ejemplo deficiente frecuencia de recolección, o bien falta de limpieza de vías y sitios públicos. Asimismo, se consideran los 2) residuos que fueron depositados directamente en los cuerpos de agua, para este caso también se considera la causal de que existe poco sentimiento de pertenencia o poca educación ambiental, lo cual se indica en el PDRT del INDER del 2017-2022.

Aunado a esto, se hizo la consideración de la información sobre el manejo de residuos sólidos de Drake, que facilita la Municipalidad de Osa, en el que se indica que se brinda del servicio de recolección de residuos una vez por semana en las comunidades de Drake, Los Planes, Rincón y El Progreso, de manera que se plantean como sucesos iniciales que la recolección de residuos es de baja frecuente, o que no se da el servicio de recolección, lo cual aplica para las viviendas muy alejadas que no se ubiquen en los centros poblacionales, o bien que para el gobierno local no sea rentable la recolección de los residuos de estas viviendas, ya sea por mala planificación o faltante de presupuesto.

Seguidamente, en lo que corresponde a los escenarios de riesgo, se definieron en función de la cantidad y tipo de residuos, en el primero se consideran residuos ordinarios de forma aislada, en el segundo residuo no tradicionales, y el tercero es la consolidación de un botadero en las riberas o dentro del cuerpo de agua, pues esta es una ubicación típica de este tipo de vertedores clandestinos.

En este caso, los desechos no tradicionales y el botadero se presentan como escenarios de consecuencias pasivas, debido a que en las visitas de campo no se determinó ninguna de las dos condiciones, no obstante, es necesaria su consideración.

A continuación, se muestra el árbol de fallos definido para la contaminación por residuos sólidos.

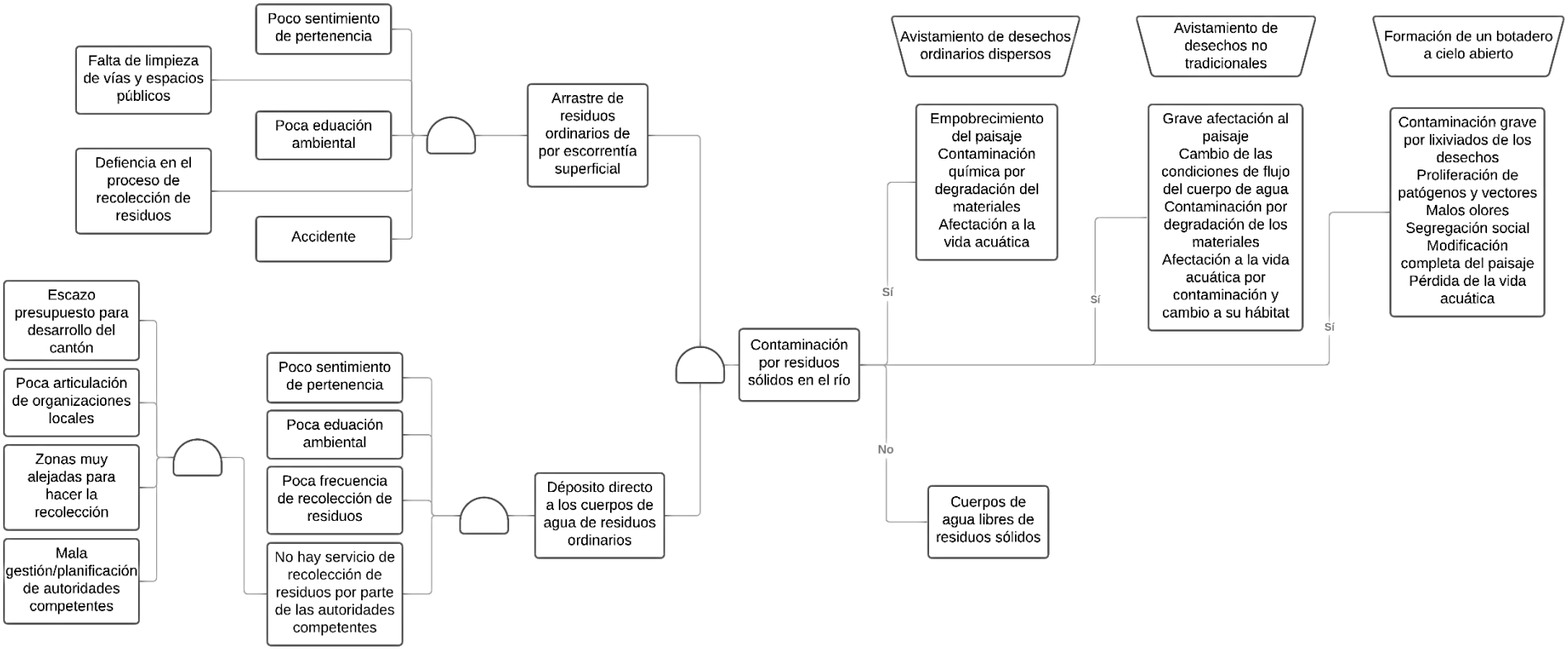


Figura 39. Árbol de fallos para la contaminación por residuos sólidos en los cuerpos de agua superficiales

A continuación, se presenta el árbol de fallos relacionado con la contaminación por procesos de deforestación. En el cual se definen como sucesos iniciadores 1) el cambio en el uso del suelo, provocado por la ampliación de las zonas urbanas, o relativo al cambio o crecimiento de las actividades productivas, que como se mencionó anteriormente las principales actividades productivas de la zona corresponden al turismo rural y las actividades agropecuarias. Esto se determinó tomando en cuenta el análisis del cambio del uso del suelo realizado mediante el empleo de imágenes satelitales y la información recopilada.

El otro suceso iniciador considerado es 2) la explotación maderera, la cual se indica en el PDRT del INDER, así como en el Plan de Manejo de la Reserva Forestal Golfo Dulce presentado por el Consejo Nacional de Áreas de Conservación del 2019. Documentos en los cuales se definen como las principales causas el crimen organizado, la debilidad institucional para abordar el tema, presencia de variedades llamativas en la zona, los bajos ingresos de la población, el poco valor agregado que tiene el producto y la tierra, así como una baja participación y compromiso de los actores sociales involucrados por arreglar el problema.

Posteriormente, la definición de los factores condicionantes para el establecimiento de los escenarios de consecuencias se realizó dependiendo del tipo uso del suelo que se le dé a la zona deforestada, lo cual se debe a que los tipos de contaminantes esperados dependen del uso, y por ende las consecuencias de la contaminación. El primer factor condicionante corresponde al aumento de las zonas urbanas o suelo desnudo sin amortiguamiento, el cual se relaciona al arrastre de sedimentos y contaminantes de las urbes, así como el aumento de la escorrentía debido a la impermeabilización del suelo.

El segundo factor condicionante se refiere al aumento de las zonas agrícolas o pastizales, lo que implica un gran arrastre de sedimentos. En este sentido también se consideró el tipo de suelo de la zona, que corresponde a Ultisoles con un horizonte argílico, que implica un aumento del 20 % en el contenido de arcillas, las cuales son partículas muy finas relacionadas con materia orgánica que puede depositarse en el fondo de los cuerpos de agua, lo que se facilita debido a la baja velocidad de flujo de los cuerpos de agua. En este caso no se consideran contaminantes como agroquímicos debido a que están incluidos en el suceso iniciador de actividades agropecuarias.

A continuación, se presenta el árbol de fallos para los procesos de deforestación.

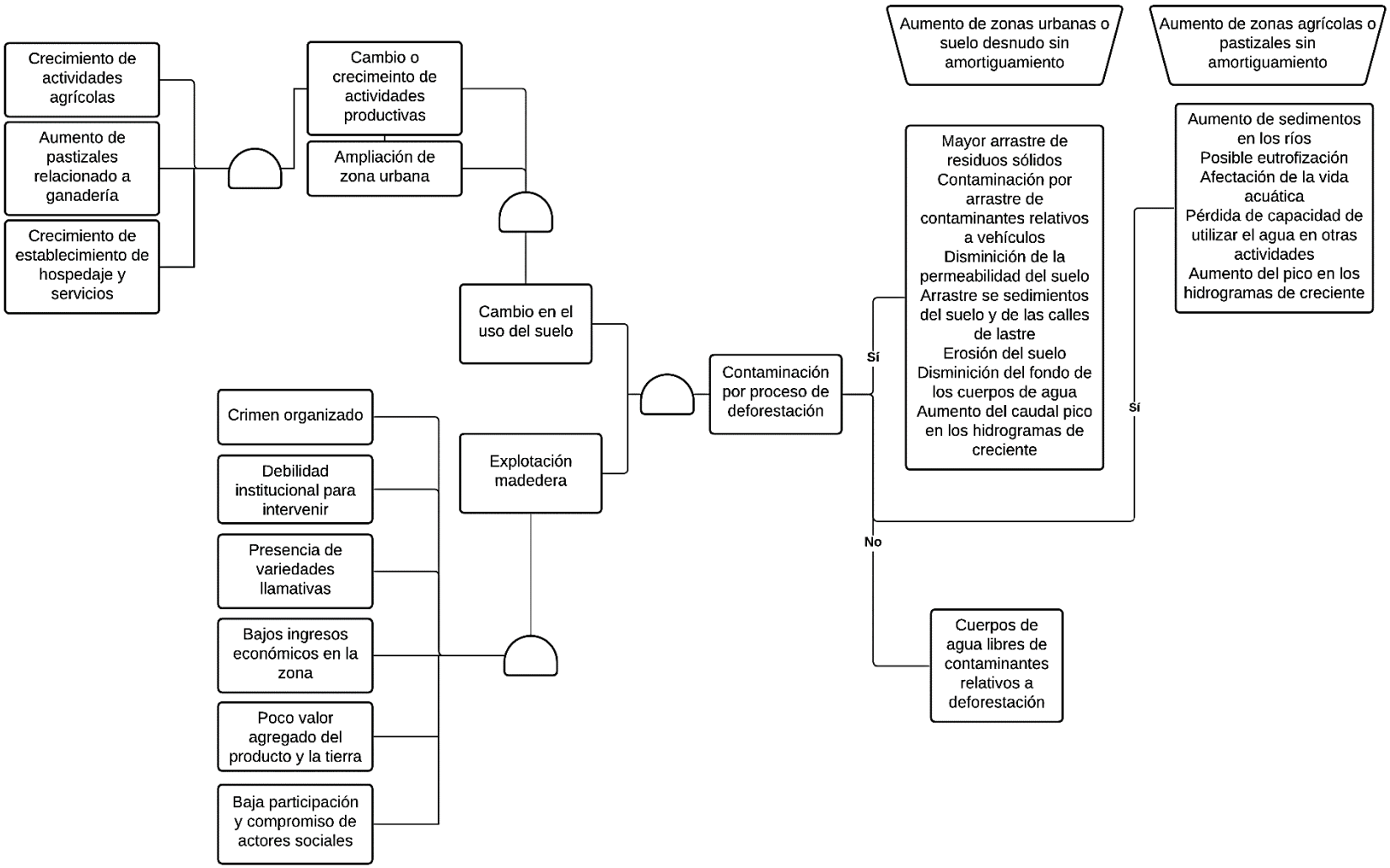


Figura 40. Árbol de fallos para la contaminación por procesos de deforestación

El último árbol de fallo generado corresponde a el de contaminación relativa a actividades agropecuarias, en este caso se definen cuatro sucesos iniciales. El primero corresponde a la 1) inadecuada aplicación de agroquímicos, lo que se relaciona con falta de controles de producción, poco acompañamiento a los productores locales por parte de la autoridades o deficiente capacitación para su uso, el segundo suceso inicial considerado es 2) derrames accidentales de agroquímicos, relacionado principalmente a inadecuada manipulación o descuidos. El tercer suceso es la 3) inadecuada gestión de las actividades por parte del propietario, este se relaciona con poca capacitación en términos agropecuarios y administrativos, insuficiente presupuesto para el adecuado desarrollo de la actividad, o bien, poca educación ambiental que lleva a la contaminación deliberada del suelo.

El cuarto suceso inicial es el 4) vertido directo de aguas residuales de origen agropecuario, las cuales se caracterizan por un alto contenido de materia orgánica, el cual se relaciona con deficiente educación ambiental, falta de infraestructura para suplir la necesidad de saneamiento o presupuesto para adquirirlas, y deficientes controles o inspección por parte de las autoridades competentes. Este es un factor relevante pues como se menciona en la Evaluación del panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito, realizado por la Universidad de Stanford en el 2013, existen muchas fincas que realizan actividades agropecuarias, pero no están debidamente registradas.

En lo que corresponde a los escenarios de consecuencias, los factores condicionantes se definen en función del tipo de contaminantes, el primero se refiere a contaminación por el uso de agroquímicos, que a su vez está relacionado a actividades agrícolas, mientras que el segundo se realizó considerando la contaminación por vertidos de alta carga orgánica, relativo a actividades ganaderas, y aunado a esto los contaminantes por fertilizantes, dado que la similitud del escenario de consecuencias.

Estos escenarios se plantaron con la consideración de que tanto en la cuenca del río Agujas, como en la cuenca de las quebradas de playa Colorada el plan regulador permite el desarrollo de actividades agropecuarias. Seguidamente, se muestra el árbol de fallos para la contaminación relativa a actividades agropecuarias (Gonzalez, 2019).

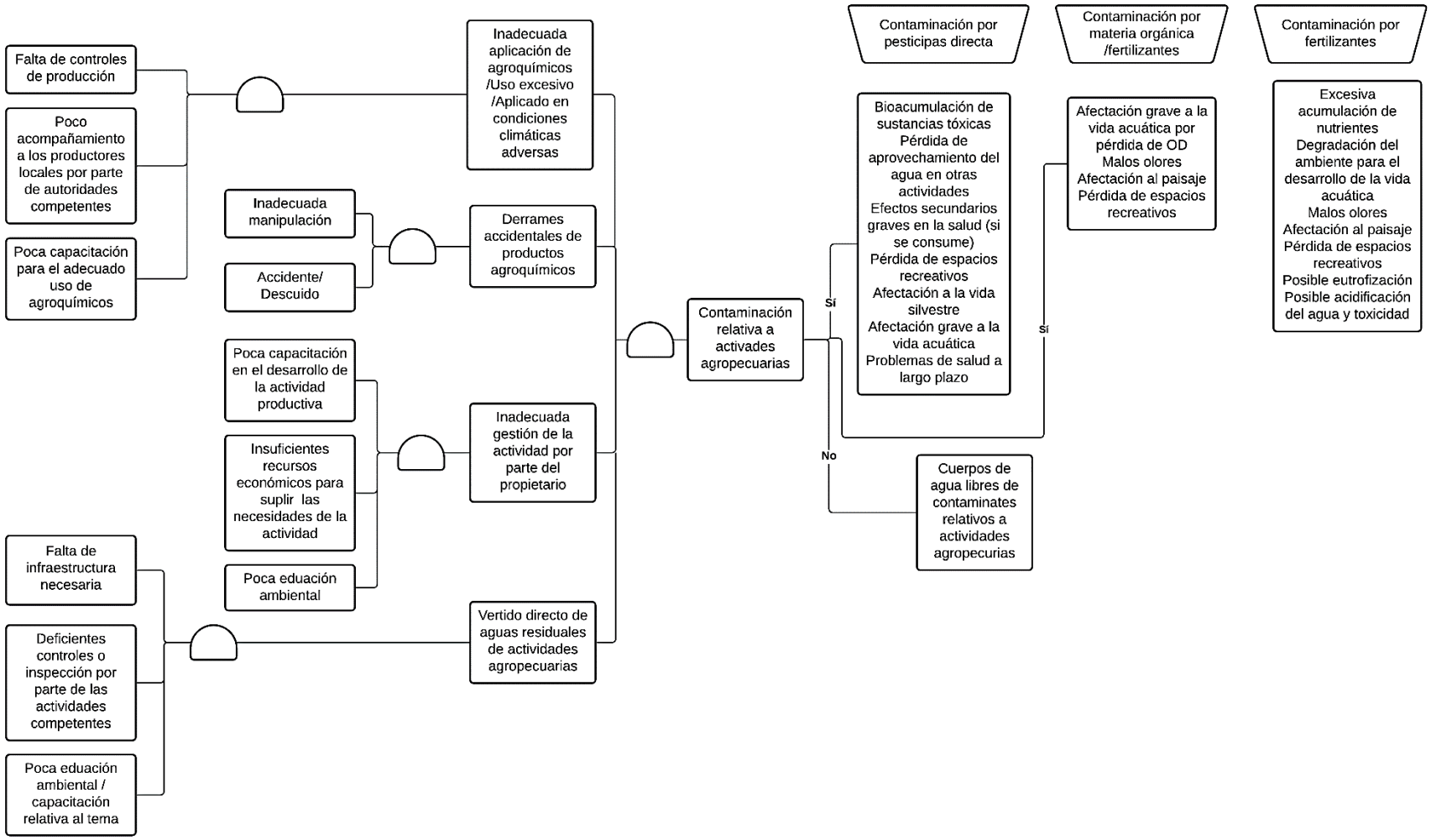


Figura 41. Árbol de fallos para la contaminación relativa a actividades agropecuaria

4.2 Estimación del riesgo ambiental

4.2.1 Sistema de evaluación de riesgo

El sistema de evaluación de riesgos ambientales que se propone corresponde al establecimiento de diferentes categorías que van de mayor a menor rango, a las cuales se les asigna un peso correspondiente, esto se aplica en la estimación de la probabilidad y la estimación de la gravedad de las consecuencias previamente expuestas, el cual se basa en las propuestas de la norma UNE 150008 para la evaluación de riesgos ambientales. A continuación, se presenta con más detalle las escalas empleadas.

Estimación de la probabilidad

La probabilidad de ocurrencia del evento se estimó considerando el periodo de retorno y el origen propio de este, de manera que estos fueron los factores considerados en la elaboración de las categorías de probabilidad para evaluar las consecuencias del riesgo. A continuación, se presenta la escala propuesta y utilizada en lo que corresponde a la frecuencia de ocurrencia.

Cuadro 42. Escala de determinación de la probabilidad de ocurrencia

Valor	Escala	Probabilidad
6	Cierto	Diariamente o al menos vez en 1 semana
5	Muy probable	Al menos una vez en 1 mes
4	Probable	Al menos una vez en 6 meses
3	Posible	Al menos una vez en 1 año
2	Poco probable	Al menos una vez en 5 años
1	Excepcional	En 5 años o más

Como se puede apreciar en el Cuadro 42, se establecen 6 escalas, la primera con una valoración de 6 hace referencia a un evento que sea parte de la cotidianidad, o bien que suceda diariamente, esto se planteó al considerar las situaciones de contaminación que estén sistematizadas en el medio. Seguidamente, con una valoración de 5, se encuentran los eventos de ocurrencia muy común, pero a diferencia de la anterior, aún no es un evento que sea parte

del engranaje social. La tercera escala, con una valoración de 4, es para eventos que sean probables de ocurrir, no obstante, no comunes en el medio.

La cuarta escala, con una valoración de 3 corresponde a eventos que sean posibles de ocurrir, esto considerando las posibilidades del medio. La quinta escala, con valoración de 2, es para eventos poco probables de que ocurran, para lo cual se le asigno un periodo comparativo de al menos una vez en 5 años, pero no más de una vez al año. Y finalmente, se estable la sexta escala, con una valoración de 1, para eventos que su aparición sea sumamente rara, y para su determinación se estableció en eventos que tomen 5 años o más en ocurrir.

La configuración de las escalas se establece con el objetivo de que respondan al comportamiento de los sucesos de contaminación, dada la frecuencia que puede ser esperable. Además, las escalas temporales buscan poder categorizar de forma eficiente los sucesos según el daño que puede significar, de manera que no es lo mismo que exista un vertido diario, a que se haga en el mismo volumen y concentración de forma mensual, o que ocurra una vez al año.

Aunado a esta categorización, debido a las condiciones del medio y a las amenazas que puedan darse, se considera también la posibilidad de evaluar las causas del suceso junto con la información del medio, con el fin de establecer un valor de probabilidad que se adapte a la realidad, siempre que el valor asignado pueda ser explicado clara y lógicamente, eso se debe principalmente a se trata de una zona de estudio amplia por lo que no se puede tener certeza de la frecuencia de ocurrencia de diversos sucesos, o bien dadas las causas es muy complejo definirla.

Estimación de la gravedad

Es necesario la estimación de la gravedad de las consecuencias que puedan tener los sucesos iniciales de manera cuantitativa, de forma que se pueda establecer el riesgo asociado a tales sucesos. La estimación de la gravedad se hace específicamente en consideración del entorno natural, dado que se pretende establecer el riesgo de contaminación en cuerpos de agua superficiales, aunque para la estimación de los escenarios de riesgo se consideren los entornos natural, socioeconómico y humano, según como se presenta en la Figura 5.

El cálculo de las consecuencias que se presenta se basa en la Norma UNE 150008 2008 - Evaluación de riesgos ambientales, aunque se hacen modificaciones sustanciales con el objetivo

de que la metodología se adapte a las condiciones del escenario de exposición como de la zona geográfica en general. En este caso, la estimación de la gravedad se calcula como la suma de los efectos del contaminante más de la vulnerabilidad del medio, según se presenta en la siguiente ecuación:

$$Gravedad = \{Cantidad + 2\ Peligrosidad + Extensión\} + Daño + Resiliencia \quad (10)$$

Donde, los parámetros considerados para establecer los efectos del contaminante en el entorno son:

- Cantidad: Probable volumen de sustancia emitida al entorno, también se puede considerar la cantidad de fuentes que representen la amenaza, o la cantidad de extensión o actores que influyen en la producción de contaminante.
- Peligrosidad: Es la propiedad o aptitud intrínseca de la sustancia de causar daño, en este aspecto se considera la toxicidad, posibilidad de acumulación, bioacumulación, entre otros.
- Extensión: Es el espacio de influencia del impacto en el entorno, es decir, la extensión de espacio físico que se verá afectada por la acción del contaminante y se relaciona directamente con la cantidad de este.

Mientras que los parámetros utilizados para establecer la vulnerabilidad del medio son:

- Daño: Nivel de daño ocasionado al medio ambiente, la capacidad que existe de recuperarlo y si se da la explotación de recursos naturales.
- Resiliencia: Capacidad del medio de adaptarse a los cambios producto del efecto del contaminante, así como el impacto que conlleva que ocurra este tipo de contaminación en el factor establecido.

A continuación, se presenta el rango que se define para cada uno de los parámetros a considerar, los cuales como se puede observar en el Cuadro 43, son sumamente similares, pues se pretende estandarizar utilizando una escala de valorización en la que se asigna un peso que va del 5 al 1, donde 5 corresponde al escenario más negativo y 1 al más positivo dadas las condiciones propias del escenario definido. La escala sugiere valores de muy alto a muy

bajo, con la excepción de la resiliencia, pues al ser un aspecto positivo su escala se define de muy baja a muy alta.

Cuadro 43. Escala para la determinación de la gravedad de las consecuencias

Valor	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia
5	Muy alta	Muy alta	Muy extenso	Muy alto	Muy baja
4	Alta	Alta	Extenso	Alto	Baja
3	Moderado	Moderado	Moderado	Moderado	Moderada
2	Baja	Baja	Poco extenso	Bajo	Alta
1	Muy baja	Muy baja	Efecto puntual	Muy bajo	Muy alta

Un ejemplo de interpretación al cuadro anterior es una consecuencia que ocurra en una muy pequeña cantidad de contaminante, y que este sea de muy baja peligrosidad, y su efecto sea muy puntual, además de que el daño que cause sea muy bajo, de modo que no afecta las condiciones iniciales del medio y, por último, el medio se adapte muy fácilmente al impacto y este no represente una amenaza a las condiciones de este, su valoración será de 6 puntos. Mientras que, si se plantea el escenario opuesto, y se usa el máximo de cada escala, la consecuencia resultante tendrá una calificación de 30 puntos.

Seguidamente se plantean características más específicas para cada uno de los parámetros según las escalas establecidas, con el objetivo de disminuir la subjetivad y la necesidad de interpretación, con el fin de que la metodología sea replicable y se reduzca la interferencia por aspectos de criterio.

El siguiente Cuadro 44 muestra la descripción de las escalas propuestas para el parámetro de cantidad de contaminante, en este aspecto se considera la contaminación por residuos sólidos, por vertidos de agua residual de origen doméstico y de ganaderías, pesticidas lixiviados y fertilizantes, asimismo, se considera el arrastre de sedimentos producto de la escorrentía superficial y por ende la influencia de la precipitación.

En este caso dada las diferencias entre los contaminantes y las consecuencias que cada uno provoca, así como sus fuentes generadoras y la limitante de que no es posible determinar una cantidad exacta en medida de volumen, se busca delimitar los aspectos de las fuentes

generadoras, excepto en el caso de la contaminación por residuos sólidos que se deja a la perspectiva de la inspección visual en el escenario de exposición para el evalúo de la cantidad de residuos que se pueda encontrar, con la sugerencia de hacer la especificación respectiva al momento de establecer un valor de cantidad.

En ese mismo sentido, en la delimitación de la cantidad de fuentes contaminantes, se decidió dejar abierto a la interpretación del analista la decisión de cuánto es una gran o poca cantidad de fuentes puntuales de vertido de agua residual, principalmente debido a que, en este caso específico no se cuenta con información de si hay un sistema de saneamiento en cada casa y de haberlo qué tipo es, relacionado a que Bahía Drake como distrito no fue contabilizado por aparte en el Cenco Nacional del 2011. Si no fuera este caso, se preferiría utilizar un sistema de porcentaje de casas que hacen un vertido directo a los cuerpos de agua de sus aguas residuales.

Asimismo, en lo que corresponde a la cantidad de contaminantes arrastrados por escorrentía superficial, se definió en función del porcentaje de área de la cuenca a la que se le asigna cada actividad en específico, pues no se cuenta en la zona con un registro específico de los productores. Aunado a esto, dado los problemas relativos a que los productores no estén inscritos ante el debido ministerio, o bien la deforestación ilegal, se prefiere mantener en porcentajes de cobertura.

Igualmente, en lo que corresponde a la cantidad de precipitación se dejó abierto a la interpretación del analista para lo cual se consideró que los valores de precitación anual promedio en Costa Rica van desde menos de 1500 mm hasta más de 7000 mm. Mientras que para la Península de Osa predominan los valores de 3000 mm a 6000 mm, los cuales se distribuyen de forma espacial tal que aumentan de forma vertical con forme se mueven al Sur.

Cuadro 44. Descripción de los valores de escala para el parámetro de cantidad de contaminante

Cantidad		
Valor	Escala	Descripción
5	Muy alta	Presencia de gran cantidad de fuentes puntuales de vertido de aguas residuales Presencia de un botadero a la orilla del río Presencia de residuos sólidos no tradicionales a lo largo del cauce Precipitación fuerte en suelo desnudo o plantaciones Aproximadamente un 70 % o más de la cuenca está cubierta por plantaciones y pastizales, o urbanizada
4	Alta	Presencia de gran cantidad de fuentes puntuales de vertido de aguas residuales Presencia de residuos tradicionales en grandes cantidades, que interfieran en el curso del agua Presencia de residuos sólidos no tradicionales Presencia de tomas ilegales que extraigan gran cantidad del caudal Precipitación fuerte en suelo desnudo o plantaciones Aproximadamente de un 50 % - 70 % de la cuenca está cubierta por plantaciones y pastizales, o urbanizada
3	Moderado	Presencia de algunas fuentes de contaminación puntual Presencia de desechos sólidos tradicionales en gran cantidad, sin interferir el curso del agua Presencia de residuos no tradicionales Precipitación moderada en suelo desnudo o precipitación fuerte en suelo con vegetación ligera Aproximadamente de un 30 % - 50 % de la cuenca está cubierta por plantaciones y pastizales, o urbanizada
2	Baja	Presencia de pocas fuentes de contaminación puntual Presencia de desechos sólidos tradicionales en poca cantidad Sin residuos no tradicionales Precipitación moderada en suelo con vegetación ligera Aproximadamente un de 20 % - 30 % de la cuenca está cubierta por plantaciones y pastizales, o urbanizada
1	Muy baja	Presencia de alguna fuente de contaminación puntual de bajo caudal Presencia de desechos sólidos tradicionales en muy poca cantidad Sin residuos no tradicionales Precitación ligera en suelo con vegetación ligera Aproximadamente un 10 % -20 % de la cuenca está cubierta de plantaciones y pastizales, o urbanizada

En el siguiente cuadro se muestra la descripción de las escalas para el parámetro de peligrosidad del contaminante, este es de los parámetros más relevantes en la determinación de riesgos ambientales para la calidad del agua. En su clasificación se considera la toxicidad del contaminante para el ambiente, aunado a los efectos que produce, para lo que se emplea la categorización de si los efectos producidos se pueden revertir, o no. Por ejemplo, si los contaminantes conllevan a la muerte y pérdida de la flora, sus efectos serán permanentes o muy difíciles de contrarrestar.

Asimismo, se considera el efecto que tiene en la vida acuática, pues se espera que un cuerpo de agua superficial sano sea aquel que protege la biota endémica y sus alrededores. Además de que el estado y tipo de especies que se encuentren funcionan como un indicador muy importante de la calidad del agua, a pesar de ello en la presente evaluación no se utilizaron bioindicadores.

Cuadro 45. Descripción de los valores de escala para el parámetro de peligrosidad del contaminante

Peligrosidad		
Valor	Escala	Descripción
5	Muy alta	Muy tóxica para especies acuáticas o vida circundante Causa efectos irreversibles Acaba con la vida acuática endémica
4	Alta	Se producen daños moderados y reversibles con intervención activa y persistente o no reversibles Se degrada la vida acuática y su entorno Se produce la inmigración de gran cantidad de las especies Tóxica para algunas especies
3	Moderado	Se producen daños moderados y reversibles con intervención activa Se degrada la vida acuática, provocando la pérdida de algunas especies y su entorno El agua no es tóxica para las especies acuáticas o vida circundante
2	Baja	Se producen daños leves y reversibles con intervención moderada Se afecta levemente la vida acuática
1	Muy baja	Se producen daños leves y fácilmente reversibles No afecta la vida acuática Sustancia no tóxica

El siguiente cuadro presenta la descripción de las escalas definidas para el parámetro de extensión, para este se considera el tipo de fuente de contaminación, esto es si se trata de fuente fija puntual o si es dispersa. En el caso de ser una fuente fija localizada, se hace la medición de la capacidad de expansión esperada para la fuente en términos de un radio medido en metros, mientras que en el caso de ser dispersa, se le asigna una categoría en función del valor de cantidad del parámetro previamente definido, como una forma de estimar la posible expansión.

En este caso, se consideró que para el establecimiento de las categorías de más bajas de tomaría como efecto puntual y poco extenso, por lo que en estas no se consideran las fuentes dispersas, sino hasta la categoría de moderadamente extenso.

Cuadro 46. Descripción de los valores de escala para el parámetro de extensión del contaminante

Extensión		
Valor	Escala	Descripción
5	Muy extenso	Provienen de una fuente puntual y su expansión se estima en un radio superior a 1 km Proviene de una fuente dispersa de cantidad alta o superior
4	Extenso	Provienen de una fuente puntual y su expansión se estima en un radio superior a 500 m Proviene de una fuente dispersa de cantidad moderada
3	Moderado	Provienen de una fuente puntual y su expansión se estima en un radio superior a 300 m Proviene de una fuente dispersa de cantidad muy baja a baja
2	Poco extenso	Efecto puntual, pero con capacidad de expansión hasta un radio de 50 metros No corresponde a una fuente dispersa
1	Efecto puntual	Efecto es puntual y localizado, de modo que no se expande por el medio No corresponde a una fuente dispersa

Seguidamente, se presentan las escalas definidas para los parámetros que representan la vulnerabilidad del ambiente, para esto en el Cuadro 47 se describe la escala establecida para el parámetro de daño, el cual considera la gravedad del daño que se hace a los cuerpos de

agua superficiales de los escenarios de exposición. Con el fin de tener más factores que permitan esclarecer la categoría adecuada a cada peligro, se considera si se explotan los recursos naturales, en lo que se considera si se hace de forma indiscriminada o consiente. Además, se toman en cuenta como una variable muy influyente al proceso el nivel de afección que se hace sobre la vida acuática, pues la calidad del agua está estrechamente relacionada con la biota.

Cuadro 47. Descripción de los valores de escala para el parámetro de daño causado al factor ambiental

Daño		
Valor	Escala	Descripción
5	Muy alto	Daño gravísimo a la calidad del agua Cambio completo negativo de las condiciones del medio Explotación indiscriminada de los recursos naturales
4	Alto	Daño severo a la calidad agua Degradación del medio acuático Explotación de los recursos naturales
3	Moderado	Daño moderado a la calidad del agua Afectación a la vida acuática Explotación moderada de los recursos naturales
2	Bajo	Daño leve a la calidad del agua Afectación leve de la vida acuática Se conservan los recursos naturales, pero se ven afectados
1	Muy bajo	Daño muy leve a la calidad del agua No se ve afectada la vida acuática Se conserva los recursos naturales sin afectación

Finalmente, el Cuadro 48 presenta la escala del parámetro de resiliencia, el cual estima las condiciones del medio que lo hacen más o menos vulnerable a los cambios que produce el contaminante en el ambiente. En este caso es importante la aclaración de que son características físicas propias del medio, tales como la influencia de la geomorfología, el tipo de suelo, la presencia de áreas silvestres protegidas, la ubicación o forma en la que se presenta el contaminante, entre otros, y no se consideran factores relativos a la probabilidad que suceda el evento, pues ese corresponde a la estimación de probabilidad.

Cuadro 48. Descripción de los valores de escala para el parámetro de resiliencia del factor ambiental

Resiliencia		
Valor	Escala	Descripción
5	Muy poca	Nula capacidad de adaptarse a los cambios producto de la contaminación Los efectos de contaminación impactan gravemente el estado del medio
4	Poca	Baja capacidad de adaptarse a los cambios producto de la contaminación Los efectos de contaminación impactan del estado del medio
3	Moderada	Baja capacidad del medio de adaptarse a los cambios producto de la contaminación Los efectos de contaminación impactan del estado del medio
2	Alta	Capacidad moderada del medio de adaptarse a los cambios producto de la contaminación
1	Muy alta	Alta capacidad del medio de adaptarse a los cambios producto de la contaminación

Una vez que se han definido los parámetros correspondientes para cada escala, se hace una valoración del total de puntos obtenidos y se le asocia un valor del 1 al 6, con el fin de que sea comparable con la escala definida para la probabilidad de ocurrencia en el Cuadro 42. En el siguiente se presenta la correspondencia a cada una de las escalas del 1-6.

Cuadro 49. Valoración de la gravedad de las consecuencias del escenario de riesgo

Valor	Escala	Puntos obtenidos
6	Catastrófico	30
5	Crítico	24 - 29
4	Severo	18 - 23
3	Moderado	12 - 17
2	Marginal	6 - 11
1	Despreciable	6

Como se puede observar en el Cuadro 49, la puntuación para una condición catastrófica corresponde a 30 puntos, que implica el peor de los escenarios planteados, mientras que se considera un riesgo despreciable solo si se caracteriza cada parámetro en las mejores condiciones posibles. Además, se presentan otras categorías intermedias que representan una gran diversidad de combinaciones.

Finalmente, la estimación se calcula como el producto de la probabilidad por la gravedad de las consecuencias. En la siguiente Figura 42 se presenta los diferentes escenarios de riesgos que se pueden presentar, así como la clasificación planteada, según su consideración.

Riesgo	Despreciable (1)	Marginal (2)	Moderado (3)	Severo (4)	Crítico (5)	Catastrófico (6)
Cierto (6)	6	12	18	24	30	36
Muy probable (5)	5	10	15	20	25	30
Probable (4)	4	8	12	16	20	24
Posible (3)	3	6	9	12	15	18
Poco probable (2)	2	4	6	8	10	12
Excepcional (1)	1	2	3	4	5	6

Riesgo alto	28 - 36
Riesgo significativo	19 - 27
Riesgo moderado	10 - 18
Riesgo leve	1 - 9

Figura 42. Matriz de estimación de riesgo ambiental

La ubicación de los diferentes escenarios planteados en la matriz de estimación de riesgo permite hacer la caracterización del riesgo, de modo que este sirva de base para plantear mejoras en la gestión ambiental, con el objetivo de mitigar el riesgo, o bien trabajar prioritariamente con amenazas activas identificadas en la evaluación.

4.2.2 Resultados de la evaluación de riesgo ambiental

En la evaluación de riesgos, se realizó la estimación de la probabilidad de ocurrencia del riesgo y la estimación de la gravedad de las consecuencias utilizando las variables definidas de cantidad, peligrosidad, extensión, daño y resiliencia del medio, tal como se indica en la Ecuación (10), se categorizó en la escala de valoración según se muestra en el Cuadro 49, con lo que se puede establecer un valor de riesgo en la escala de 1 a 30, para posteriormente proceder a su caracterización por medio de la matriz de estimación.

La elección de los escenarios de riesgo se hizo a partir del análisis de los árboles de fallo, en la se emplearon los factores condicionantes como los catalizadores del evento y las consecuencias de cada uno de los eventos fueron las evaluadas según las variables antes mencionadas para la gravedad, aunado a esto se consideraron los aspectos propios de cada cuenca como su geomorfología, el uso del suelo, las principales actividades productivas de cada una, entre otros. Asimismo, en la determinación de la probabilidad de ocurrencia del escenario de riesgo se estimó considerando las características propias del medio, y la influencia de los sucesos iniciales según la descripción del escenario de exposición.

Los resultados se presentan en los siguientes cuadros, en los que se muestra el valor asignado a cada parámetro según el factor condicionantes que define el medio en ese aspecto específico y que genera el escenario de riesgo, la valoración del escenario, la probabilidad de ocurrencia, y finalmente el riesgo asociado, esto para cada cuenca.

.

Cuadro 50. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas en la cuenca del río Agujas

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
OD ≤ 5 mg/L DQO > 20 mg/L Colif. Fecales > 20 NMP	2 Baja	1 Muy baja	3 Moderado	2 Bajo	2 Alta	11	2	6 Cierto	12
OD ≤ 4 mg/L DQO > 25 mg/L Colif. Fecales > 1000 NMP	2 Baja	4 Alto	3 Moderado	3 Moderado	3 Moderada	19	4	5 Muy probable	20
OD ≤ 3 mg/L DQO > 50 mg/L Colif. Fecales > 2000 NMP	2 Baja	5 Alta	3 Moderado	4 Alto	3 Moderada	22	5	3 Posible	15
Condiciones para el desarrollo de eutrofización	2 Baja	5 Alta	3 Moderado	5 Muy alto	3 Moderada	23	5	3 Posible	15

Cuadro 51. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas en la cuenca de playa Colorada

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
OD ≤ 5 mg/L DQO > 20 mg/L Colif. Fecales > 20 NMP	3 Moderada	1 Muy baja	4 Alta	3 Moderado	3 Moderada	15	3	6 Cierto	18
OD ≤ 4 mg/L DQO > 25 mg/L Colif. Fecales > 1000 NMP	3 Moderada	4 Alta	4 Alta	4 Alto	4 Poca	23	4	6 Cierto	24
OD ≤ 3 mg/L DQO > 50 mg/L Colif. Fecales > 2000 NMP	3 Moderada	5 Alta	4 Alta	5 Alto	5 Nula	27	5	5 Muy probable	25
Condiciones para el desarrollo de eutrofización	3 Moderada	5 Alta	4 Alta	5 Muy alto	5 Nula	27	5	5 Muy probable	25

Los primeros resultados corresponden al escenario de riesgo creado por el vertido de aguas residuales domésticas en los cuerpos de agua, en el que se presenta uno para la cuenca del río Agujas y otro para la cuenca de playa Colorada. En ambos casos los factores condicionantes se refieren a la calidad del cuerpo de agua según los parámetros de OD, DQO y coliformes fecales, además del factor que corresponde a las condiciones para el desarrollo de eutrofización.

Inicialmente, para la cuenca del río Agujas, se coloca un valor de Baja cantidad debido a la baja densidad poblacional que tiene la cuenca, principalmente relacionado a la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce, lo cual se refleja con que, según la clasificación supervisada de las imágenes satelitales, para el 2020 solo el 6 % de la cuenca tiene una cobertura de suelo desnudo o urbanizado, como se presenta en el Cuadro 13. Es importante notar que para el parámetro de cantidad el valor es el mismo para todos los factores, debido a que no se consideró la calidad del agua de los cuerpos de agua en su definición, sino que se relaciona con la cantidad de fuentes, pues no se tienen caracterizados los vertidos, debido a su complejidad, asimismo, dado que se desconoce el porcentaje de viviendas que tengan un vertido directo, la evaluación se hace con respecto al uso de suelo correspondiente a uso habitacional en comparación con el área de la cuenca.

En contraparte, para la cuenca de la playa de Colorada se estableció un valor de Moderada cantidad, debido al crecimiento poblacional de la zona, pues además de estar fuera de la Reserva Forestal, el plan regulador la define como un área para la densificación de las actividades turísticas, lo que a su vez implica un fuerte atracción de habitantes, dado que se espera sea una zona que genere puestos de trabajo, esto a su vez se puede corroborar con el aumento de las zonas sin vegetación y urbanizadas de la cuenca, donde el análisis del uso del suelo señala cerca de un 28 % para el 2020 corresponde a suelo urbanizado o suelo desnudo, según se muestra en el

Cuadro 15. Aun así, el parámetro se mantuvo como moderado, debido a que, en la comparación del uso de suelo actual con el plan regulador, se puede observar mucho espacio disponible para el desarrollo urbano.

Seguidamente, la peligrosidad es un factor que depende de las concentraciones de los indicadores determinados en los cuerpos de agua, de modo que los valores asignados están

relacionados a las consecuencias de cada factor, por ende, los resultados para cada factor condicionante serán los mismos en la cuenca del río Agujas y en las quebradas de la cuenca de playa Colorada. Entonces, según se presenta en el Cuadro 45, en el primer escenario la peligrosidad se considera Muy baja, debido a que no se afecta a la vida acuática. Al segundo escenario se le asigna un valor de Alta peligrosidad dado que deteriora la vida acuática provocando la emigración de algunas especies o su muerte, no obstante, se considera que las condiciones pueden ser reversibles, pero con fuertes acciones activas. Finalmente, al tercer escenario se le asigna una categoría de Muy alta peligrosidad, pues la vida acuática se ve severamente deteriorada o muere, y sus consecuencias son muy difíciles de revertir. Lo cual se definió utilizando los rangos del Reglamento para la evaluación y clasificación de cuerpos superficiales (Cuadro 2) e información relativa al oxígeno disuelto requerido en el agua disponible en el Anexo B.

El siguiente escenario a considerar para establecer el nivel de peligrosidad corresponde a las condiciones para se desarrolle el proceso de eutrofización del agua, el cual es sumamente agresivo y puede acabar con la biota al reducirse el oxígeno disuelto al producirse un sobrealimento de plantas y otros organismos que consumen grandes cantidades de oxígeno durante su crecimiento y luego morir por la falta de este, lo que conlleva a que se dé un cambio en las condiciones del ecosistema y por ende, se potencia la presencia de especies invasoras, además de la proliferación de bacterias y la liberación de toxinas. Dado lo anterior, a este parámetro se le asigna un valor de Muy alta peligrosidad.

Seguidamente, el parámetro por evaluar es el espacio de influencia del impacto del contaminante en el medio denominado extensión, en este caso el valor se determina en función del tipo de fuente, ya sea dispersa o puntual. Como se trata de fuentes dispersas la definición se hace considerando el valor asignado para el parámetro de cantidad. En el caso de la cuenca del río Agujas, se determinó un valor de cantidad baja, por lo que se considera de extensión Moderada, mientras que para la cuenca de playa Colorada se definió un valor de alta extensión, debido a que el valor de cantidad se estableció en Moderada.

En lo que corresponde a los parámetros que indican la vulnerabilidad del medio, el primero es el nivel de daño ocasionado al ambiente, para lo que se hizo una valoración de los parámetros previos, los cambios entre cada escenario se den principalmente relacionado al aumento de la

peligrosidad de las condiciones, mientras que la diferencia entre la cuenca del Agujas y la cuenca de playa Colorada se da por el aumento de la cantidad y la extensión.

El último parámetro es la resiliencia, para el cual se consideran las características del medio, como las geomorfológicas, la precipitación y las condiciones de cobertura del suelo, principalmente aguas arriba. En ese sentido, para la cuenca del río Agujas los aspectos positivos del medio que se tomaron en cuenta fue que se trata de una cuenca de área considerable, en comparación con su parte habitada, y la parte alta y media tienen una densa cobertura vegetal por la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce, las altas precipitaciones en la zona aunado al tipo de hidrograma de creciente esperado, mientras que los aspectos negativo corresponden a las bajas velocidades del flujo y las condiciones topográficas típicas de un río de planicie, que reducen la aireación natural.

De manera que para esta cuenca en el primer escenario se considera una Alta resiliencia debido a principalmente al daño que implica, en el segundo, tercero y cuarto escenario se considera una resiliencia Moderada, debido a los factores positivos de la cuenca, en contraposición con la gravedad de las consecuencias que implican. Seguidamente, para la cuenca de playa Colorada, se consideraron como aspectos positivos a la resiliencia de la cuenca la cobertura vegetal densa en el sector este de la cuenca, los altos niveles de precipitación, mientras que en los aspectos negativos se tiene el aumento de la zona urbanizada, las muy bajas velocidades de flujo esperadas y la baja pendiente del cauce en la cuenca, debido a que es menor la aireación natural posible y el hidrograma de creciente esperado.

De modo que, en la cuenca de playa Colorada para el primer escenario se estableció una resiliencia Moderada, mientras que para el segundo un valor de Poca resiliencia, y para el tercero y cuarto un valor de Muy baja resiliencia, principalmente relacionado al daño que implica cada uno de los escenarios y como se reducen las posibilidades de la cuenca de responder.

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia, en este caso se definió considerando los datos de calidad del agua obtenidos y los sucesos iniciales establecidos. En el caso de la cuenca del río Agujas el primer escenario se le asigno un valor de Cierto debido a que el valor de DQO está muy por encima de los valores del rango establecido y los valores del OD son cercanos a 5 mg/L en diversos puntos, y en julio 2019 en RA 3 es cercano a 3 mg/L. Para el escenario dos,

se determinó un valor de Muy probable, pues los valores de DQO se encuentran en un rango de 20 mg/L hasta los 270 mg/L, sin que sea por influencia de la salinidad, no obstante, los otros parámetros se alejan del rango. El tercer escenario se determina como Posible, debido que los indicadores de OD y coliformes fecales están muy fuera de su rango (Cuadro 37).

En lo que corresponde a la probabilidad de que se desarrollen condiciones para la eutrofización se le asigno un valor de Posible, pues se considera que el vertido de aguas domesticas puede incluir contener detergentes con altas concentraciones de fósforo, aunado a la materia orgánica del vertido.

En la cuenca de las quebradas de playa Colorada, el primer y el segundo escenario se categorizaron como Ciertos, debido a que el OD medido fue siempre menor a 5 mg/L, y solo dos muestras superaron los 4 mg/L, además los valores de DQO están cerca de los 20 mg/L, mientras que los resultados de coliformes fecales se encuentran en un rango de los 700 NMP a >16000 NMP. De manera que el siguiente escenario se le estableció un valor de Muy probable al igual que el escenario de las condiciones para el desarrollo de eutrofización, esto debido a los resultados y las bajas velocidades de flujo.

Cuadro 52. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por residuos sólidos en la cuenca del río Agujas

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Contaminación con residuos sólidos dispersos	1 Muy baja	3 Moderado	3 Moderado	3 Moderado	2 Alta	15	3	3 Posible	9
Presencia de residuos no tradicionales en el cauce o riberas	3 Moderada	3 Moderado	4 Extenso	4 Alto	3 Moderado	20	4	2 Poco probable	8
Condición de botadero o vertedero a cielo abierto en el cauce o riberas	5 Muy alta	5 Muy alto	5 Muy alto	5 Muy alto	5 Muy poca	30	6	1 Excepcional	6

Cuadro 53. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por residuos sólidos en la cuenca de playa Colorada

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Contaminación con residuos sólidos dispersos	2 Baja	3 Moderado	3 Moderado	3 Moderado	3 Moderado	17	3	6 Cierto	18
Presencia de residuos no tradicionales en el cauce o riberas	3 Moderada	3 Moderado	4 Extenso	4 Alto	3 Moderado	20	4	3 Posible	12
Condición de botadero o vertedero a cielo abierto en el cauce o riberas	5 Muy alta	5 Muy alta	5 Muy alto	5 Muy alto	5 Muy poca	30	6	1 Excepcional	6

En lo que corresponde al escenario de riesgo definido por el suceso inicial de contaminación por residuos sólidos se establen tres factores condicionantes en función de la cantidad y tipo de residuos. En el primer escenario corresponde contaminación por residuos sólidos dispersos de manera que para la cuenca del río Agujas se define un valor de Muy baja cantidad, tal y como fue observado en la cuenca. Mientras que para la cuenca de playa Colorada el valor se aumenta a Baja cantidad pues la cuenca es más pequeña de modo que la misma cantidad de residuos que se consideran en ambas cuencas es mayor cantidad de forma proporcional.

En el segundo escenario, de presencia de residuos no tradicionales, se la signa una categoría de Moderado para ambas cuencas pues es parte de las consideraciones del Cuadro 44 al definirse por el tipo de residuos que generalmente son de gran tamaño. Finalmente, el tercer escenario corresponde al establecimiento de la condición de botadero, en este caso se asigna un valor de Muy alta cantidad de residuos dado el factor condicionante, esto aplica para ambas cuencas.

El segundo parámetro evaluado es la peligrosidad, la cual es igual en ambas cuencas pues el resultado es intrínseco del contaminante. En el primer y segundo escenario, se considera un valor de Moderada peligrosidad, pues los daños son reversibles con intervención activa y persistente, además de que se afecta la vida acuática y su entorno, y los residuos pueden ser tóxicos para algunas especies. En el tercer escenario, se considera de peligrosidad Muy alta, pues una condición de botadero en el río es devastadora para la vida acuática, producto de los residuos y sus lixiviados, relativos a la materia orgánica que se agrega en este escenario, y se puede considerar que sus efectos son irreversibles, principalmente por la infiltración de contaminantes.

El tercer parámetro es la extensión del impacto en el entorno, en este caso se determina en función del tipo de fuente y la cantidad de contaminantes. De modo que para el primer escenario se define para ambas cuencas una extensión Moderada, dado que se trata de una fuente de tipo dispersa y cantidades muy baja y baja, para la cuenca del río Agujas y playa Colorada, respectivamente. En el segundo escenario, que corresponde a la presencia de residuos no tradicionales, los cuales se consideran como fuentes no puntuales de contaminación pues no se tiene control de donde serán depositados, y dado que tiene una valoración de cantidad Moderada se define como un efecto Extenso.

El tercer escenario corresponde al establecimiento de condiciones de un botadero, el valor de extensión denominado es de Muy Alta, debido a que se trata de una fuente puntual, sus efectos son realmente perjudiciales además de su gran capacidad de expansión y la bioacumulación e infiltración de contaminantes, a lo que se le suma la contaminación del aire por liberación de gases de los procesos de descomposición. Esta valoración aplica para ambas cuencas.

Seguidamente, se contemplan los parámetros que corresponden a la vulnerabilidad del medio, el primero es el daño. En el primer escenario, de residuos sólidos dispersos se determinó una condición de daño Moderado, dada la afectación a la vida acuática y la calidad del agua, en contraposición con la cantidad de residuos. En el segundo escenario se estableció el mismo valor de daño Alto, en el que se consideró la afectación a la vida acuática y las condiciones de flujo normales del río, además de la calidad del agua cuando se da la degradación de los desechos, aunado a un fuerte impacto en el paisaje. El tercer escenario para el parámetro de daño se definió un valor de Muy alto en ambas cuencas, pues la degradación de la calidad del agua y el medio para la existencia de la vida acuática además afecta complemente el paisaje y se pierde cualquier modo de aprovechamiento del agua.

El ultimo parámetro considerado es la resiliencia del medio, para la cuenca del río Agujas se consideran como aspectos positivos la cobertura forestal o pastizales alrededor del río, la baja densidad poblacional, la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce en un alto porcentaje de la cuenca, las bajas pendientes que contribuyen a baja velocidad de escorrentía lo que reduce la capacidad de que lleguen los residuos a los ríos, mientras que como aspectos negativos se considera que se trata de una cuenca exorreica, que sus ríos son de tirante bajo y amplio cauce. De modo que, para la cuenca se estableció un valor de resiliencia Alta para el primer escenario, de resiliencia Moderada para el segundo, debido al aumento en el daño, y de Muy poca resiliencia en el tercer escenario, principalmente relacionado a los problemas que conlleva la presencia de un botadero.

Por otro lado, se consideraron como aspectos positivos a la resiliencia de la cuenca de playa Colorada las bajas pendientes en la cuenca, además en la cuenca para el 2020 se tiene una cobertura de suelo mayoritariamente de vegetación ligera o densa con un 62,5 %, mientras que de suelo sin cobertura vegetal es de 28,2 % (con un 9,2 % de datos desconocidos), mientras que como aspectos negativos, se considera la pérdida de cobertura vegetal de la cuenca y el aumento de las urbes, además de las pendientes profundas alrededor del cauce.

De manera que para el primer y segundo escenario se determinó un valor de Moderada resiliencia, mientras que en el tercer escenario se determinó de Muy poca resiliencia.

Seguidamente, con respecto a la probabilidad de ocurrencia se consideraron aspectos tales como que en los poblados se da recolección de residuos sólidos por parte del gobierno local una vez por semana, no obstante, quedan fuera las viviendas muy alejadas de Los Planes y Drake. Además, existen proyectos de recolección de residuos no tradicionales que se realizan de forma articulada con el Ministerio de Salud. Otro aspecto considerado es el aumento de visitantes a las áreas del sistema SINAC, principalmente al PN. Corcovado y al R.B. Isla del Caño, lo que implica un aumento de los residuos sólidos generados. Aunado a esto, según los problemas presentados por el PDRT se considera un poco sentido de pertenencia de la población, a lo que se le agrega una deficiente cultura ambiental, lo cual se complementó con lo observado en las visitas de campo.

De manera que, para la cuenca del río Agujas se determinó para el primer escenario un estado de Posible, mientras que en el segundo un valor de Poco probable, y finalmente en el tercero de Excepcional, pues se considera que no existen los elementos necesarios para que se desarrolle. Seguidamente, en lo que corresponde a la cuenca de playa Colorada se estableció para el primer escenario un valor de Cierto, debido a que en la visita de campo fue posible observar residuos dispersos en las riberas de la quebrada El Mono, en el segundo escenario se determinó un estado de Posible, y en el tercer escenario de Excepcional.

Cuadro 54. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación relativo a actividades agropecuarias en la cuenca del río Agujas

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Contaminación por uso de pesticidas	2 Baja	5 Muy alta	3 Moderado	5 Muy alta	3 Moderada	23	4	4 Probable	16
Contaminación por vertidos de aguas residuales con alta carga orgánica	2 Baja	3 Moderado	3 Moderado	4 Alto	4 Alta	19	4	4 Probable	16
Contaminación por uso de fertilizantes	2 Baja	5 Muy alta	3 Moderado	5 Muy alta	3 Moderada	23	4	4 Probable	16

Cuadro 55. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación relativo a actividades agropecuarias en la cuenca de playa Colorada

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Contaminación por uso de pesticidas	1 Muy baja	5 Muy alta	3 Moderado	5 Muy alta	2 Baja	21	4	3 Posible	12
Contaminación por vertidos de aguas residuales con alta carga orgánica	1 Muy baja	3 Moderado	3 Moderado	4 Alto	3 Moderada	17	3	3 Posible	9
Contaminación por uso de fertilizantes	1 Muy baja	5 Muy alta	3 Moderado	5 Muy alta	2 Baja	21	4	3 Posible	12

Tal y como se presenta en los Cuadro 54 y Cuadro 55 el tercer escenario evaluado corresponde a la contaminación relativa a actividades agropecuarias, en el que se presentan tres factores condicionantes según el tipo de contaminante esperado, el primero corresponde a la contaminación por pesticidas, el segundo por vertido de ganaderías con excesiva materia orgánica, y el tercero por contaminación por el uso de fertilizantes. El primer parámetro evaluado es la cantidad de contaminante, el cual se determinó mediante la aproximación de la cobertura de suelo que se utiliza para actividades agropecuarias, y en comparación con las principales actividades productivas, y la cantidad de precipitación en la zona.

En la cuenca del río Agujas, se define para los tres escenarios planteados un valor de cantidad Baja, debido a que según el estudio de uso de suelo realizado un 21,4 % corresponde a suelo con cobertura vegetal ligera para el 2020 (con un 19,8 % de datos desconocidos), lo que engloba pastizales y plantaciones, no obstante, esto no diferencia la actividad productiva. En adicción se considera que existe un régimen pluvial muy alto, con precipitaciones promedio mayores a 5000 mm anuales, aunado al hecho que la agricultura y ganadería son de las principales actividades productivas. En lo que corresponde a la cuenca de playa Colorada, se determinó un valor de cantidad Muy Baja, debido a que se estima que para el 2020 un 16,6 % de la cuenca corresponde a vegetación ligera (con un 9,2 % de datos desconocidos), además de que en este sector la principal actividad productiva es el turismo rural, a lo que se agrega que se espera una menor precipitación cerca de la costa.

El segundo parámetro corresponde a la peligrosidad del contaminante, para el primer escenario de contaminación por pesticidas se determinó un valor de peligrosidad Muy alta, debido a la degradación del medio, la afectación a la biota y el riesgo de consumo. Para el segundo escenario, se define una peligrosidad Moderada por los efectos adversos relativos al aumento de la cantidad de materia orgánica en los cuerpos de agua, así como la degradación del paisaje. Para el tercer escenario, se estableció una peligrosidad Muy alta, debido a la acumulación de nutrientes que afecta al medio, y la posible formación de eutrofización, además de las posibles condiciones de toxicidad producto del amoniaco y dióxido de nitrógeno (ambos en estado gaseoso), la acidificación del agua por la captación y asimilación del amonio por las raíces de las plantas, en la nitrificación y lixiviación del nitrato.

El tercer parámetro corresponde a la extensión del contaminante, para esto se consideró que se trata de una fuente difusa que se determinó en una cantidad baja para la cuenca del río

Agujas y muy baja para la cuenca de playa Colorada, por lo que en ambos casos se define una extensión Moderada. Lo cual se hace considerando el espacio fijo de la contaminación, en el que se comprende el hecho de suceder en diversas partes de la cuenca.

Para el parámetro de daño en el ambiente, en el caso de los escenarios de contaminación por pesticidas y fertilizantes se estableció un valor de daño Muy alto, relativo a las consecuencias que conlleva en la vida acuática y el medio, mientras que para el escenario que contempla el vertido de aguas residuales con alto contenido de materia orgánica producto de actividades ganaderas se estableció un valor de daño Alto.

Seguidamente, el segundo parámetro corresponde a la resiliencia, en el cual para la cuenca del río Agujas se consideran como aspectos positivos la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce, mientras que como aspectos en contra se toma la densidad de drenaje, la forma de la cuenca, las bajas velocidades de flujo y que se trata de un flujo subcrítico, las fuertes precipitaciones que pueden lavar el suelo y provocar una fuerte escorrentía, de manera que para la cuenca se establece para la contaminación por pesticidas y fertilizantes un valor de resiliencia Moderada, mientras que para la contaminación por vertido de aguas residuales de ganadería se establece una resiliencia Alta.

Se consideran como aspectos positivos a la resiliencia, para la cuenca de playa Colorada, la alta cobertura de vegetación densa, que la cuenca forma parte de un corredor biológico, la baja densidad de drenaje de la cuenca y su forma, por otra parte, como aspectos negativos se tiene las bajas velocidades de flujo, las fuertes precipitaciones, y el área de captación de la cuenca, de manera que para la contaminación por pesticidas y fertilizantes se estableció una resiliencia Baja. Finalmente, para la contaminación por vertido de aguas residuales de fuente agropecuaria se establece una resiliencia de Moderada.

En lo que corresponde a la posibilidad de ocurrencia, para la cuenca del río Agujas se considera que las actividades se encuentran validadas y promovidas por el plan regulador, además de ser de las principales actividades económicas que se realizan. En términos de contaminación por un mal empleo de los productos se considera lo denunciado por el PDRT en el que señala el poco o nulo acompañamiento que reciben los productores del lugar, además que no existe un colegio técnico que instruya en este sentido. En contraparte se tiene que la cuenca media y alta están ocupadas por la Reserva Forestal Golfo Dulce y en este entorno no están

permitidas las actividades agropecuarias. De manera que, se estableció una condición de Probable contaminación por actividades agropecuarias.

Finalmente, para la cuenca de playa Colorada, se considera que las actividades agropecuarias están permitidas y promovidas por el plan regulador, las cuales se espera que se desarrollen con mayor intensidad en el sector este que corresponde a la cuenca de la quebrada Don Carmen debido a que en el sector oeste existe mayor intensidad de actividades relativas al turismo en la que participan más del 50 % de la población, lo que se refuerza con lo indicado por el estudio de uso de suelo, en el que se señala de disminución de áreas de pastizales y plantaciones para convertirse en zona urbanizada sin que disminuyan la cobertura forestal. Aunado a esto, en esta cuenca influyen los factores educacionales y de acompañamiento mencionados anteriormente. Por lo que en la cuenca se considera un valor de Probable contaminación por actividades agropecuarias, relacionado a que esta no es la principal actividad de la cuenca y su tamaño.

Cuadro 56. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por deforestación en la cuenca del río Agujas

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Aumento de zonas urbanas o suelo desnudo	2 Baja	4 Alta	3 Moderado	3 Moderado	4 Poca	20	4	2 Poco probable	8
Aumento de zonas agrícolas o pastizales)	3 Moderada	3 Moderada	4 Extenso	4 Alto	3 Moderada	20	4	3 Posible	12

Cuadro 57. Resultado de evaluación del escenario de riesgo de contaminación por deforestación en la cuenca de playa Colorada

Escenario de riesgo	Cantidad	Peligrosidad	Extensión	Daño	Resiliencia	Total	Valoración	Probabilidad	Riesgo
Aumento de zonas urbanas o suelo desnudo	3 Moderado	4 Alta	4 Extenso	4 Alto	4 Poca	23	4	4 Probable	16
Aumento de zonas agrícolas o pastizales	3 Moderada	3 Moderada	4 Extenso	3 Moderado	3 Moderada	19	4	2 Poco probable	8

El último suceso iniciador considerado es la contaminación por deforestación, en lo que se relaciona especialmente el arrastre de contaminantes a los cuerpos de agua, de manera que los factores condicionantes se definen en función del tipo de cobertura de suelo, partiendo del principio que toda cuenca urbanizada inicio como una cuenca rural, aunado al tipo de datos disponibles se establecieron como los dos factores el aumento de zonas urbanizadas o de suelo desnudo y el aumento de zonas agrícolas o pastizales. Para este último factor en específico no se considera el arrastre de pesticidas o fertilizantes pues está incluido en el suceso iniciador anterior, y se relaciona más con el aumento de sedimentos por erosión, cambios directos en la escorrentía, y otros contaminantes.

De manera que, para el primer parámetro de cantidad de contaminante se utilizaron las variables de cantidad de precipitación y tipo de cobertura del suelo. Para la cuenca del río Agujas, en el primer escenario se toma como referencia que se mantiene un valor cercano al 6 % del área total de la cuenca de zona sin vegetación desde el 2000 hasta la evaluación del 2020, a lo que se agrega cantidades altas de lluvia, en promedio superior a los 5000 mm anuales, que corresponde a uno de los valores más altos del país, por lo que se estableció un valor de Baja cantidad.

Mientras que, en el segundo escenario, se tiene un porcentaje de vegetación ligera que se aproxima a un 20 % del área total sin cambios bruscos desde el 2000, uno de los datos más completos corresponde al 2018 en donde se tiene un porcentaje de 24,9 % (con 3,9 % de datos desconocidos), no obstante, en las imágenes se observa una tendencia de expansión, aunque muy lenta en el sector oeste de la cuenca, y en los alrededores del río en la cuenca media, por lo que se le asigna un valor de Moderada cantidad.

En lo que respecta a la cuenca de playa Colorada, para el primer escenario se tiene un fuerte aumento de la cobertura de suelo por urbanización o suelo desnudo, tal que del 2000 al 2018 casi se duplicó el porcentaje existente, el cual para el 2020 se determinó en 28,2 % (con 9,2 % de datos desconocidos), aunado a los registros de precipitación de la zona se establece una condición de Moderada cantidad. En lo que corresponde al segundo escenario, por el contrario, se tiene una disminución de la cantidad de vegetación ligera el cual tiene para el 2018 un porcentaje de 27,6 % (con un 3 % de datos desconocidos), este patrón se refuerza desde el 2000 al 2020, el suelo principalmente ha pasado de ser principalmente urbanizado o sin cobertura vegetal, pues se mantiene el porcentaje de cobertura de vegetación densa

prácticamente constante para el mismo periodo, en ese sentido se estableció una cantidad Moderada, principalmente relacionado al porcentaje existente.

El siguiente parámetro corresponde a la peligrosidad de los contaminantes, para el primer escenario se relaciona con contaminantes vehiculares, lixiviados de residuos sólidos de origen orgánico, o concentraciones de sedimentos debido a la ausencia de vegetación. En específico para los sedimentos producto de la erosión, pueden tener presencia de metales como el magnesio, hierro o aluminio, que son parte de la formación de los suelos Ultisoles característicos de la zona, además de minerales como sodio, potasio y calcio, estos sedimentos son de textura fina a muy fina, pues corresponde a arcillas. Es así como para el primer escenario se establece una peligrosidad Alta para el primer escenario, y Moderada para el segundo.

El siguiente parámetro corresponde a la extensión del contaminante, en este caso se considera que los contaminantes provienen de una fuente fija dispersa, por lo que se basa en la cantidad definida previamente. En el parámetro de daño, para la cuenca del río Agujas en el primer escenario se estableció un valor de daño Moderado, dado que existe una baja cantidad de áreas de potencial contaminantes aunado a la capacidad de amortiguamiento de los ríos. Mientras que para el segundo escenario se determinó un posible daño Alto, relacionado principalmente a lo extenso de la actividad y las condiciones adversas que puede significar para el medio acuático el aumento de sedimentos.

Seguidamente, para la cuenca de playa Colorada en el primer escenario se estableció un valor de daño Alto debido a que las zonas urbanas se consideran extensas en comparación con el resto del área de la cuenca, aunado a que debido a las causas que determinan el cambio de suelo, estas son muy difíciles de cambiar, además de que los resultados requieren una intervención directa en los cuerpos de agua, por lo que se determinó un valor Alto de daño. En lo que respecta al segundo escenario, se determinó un valor de daño Moderado.

El último parámetro es el de resiliencia del medio, para el cual en la cuenca del río Agujas se consideran como aspectos positivos la amplia cobertura vegetal densa de la cuenca, lo que funciona como zonas de amortiguamiento, aunado a las bajas pendientes y forma de la cuenca que establecen una velocidad de escorrentía menor, asimismo los suelos Ultisoles tienen un adecuado drenaje interno, por lo que se espera una menor escorrentía y mayor infiltración, además de la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce.

Mientras que entre los aspectos negativos se considera que el río Agujas presenta un flujo subcrítico por lo que se espera una menor velocidad de flujo favoreciendo la sedimentación de partículas, la alta densidad de drenaje, la presencia de suelos arcillosos, de manera que para el primer escenario se determina una resiliencia Poca, pues en este caso se agrega el hecho de que las zonas urbanas ubicadas están en la cuenca baja y media y cercanas a los cuerpos de agua, por otro lado en el segundo escenario se establece un valor de resiliencia Moderada, pues las zonas de agricultura y pastizales están generalmente rodeadas de vegetación densa que cumplen la función de amortiguar el impacto.

En la determinación de la resiliencia para la cuenca de playa Colorada, se consideraron como aspectos positivos la cobertura vegetal en el sector este de la cuenca, las bajas pendientes que definen la cuenca, la baja densidad de drenaje que dificulta la llegada directa de la escorrentía a los cuerpos de agua, la regularidad del relieve, mientras que como aspectos negativos se tiene las pendientes pronunciadas que definen los cauces de las quebradas, el tipo de suelo arcilloso, que la quebradas presentan un tipo de flujo subcrítico y de bajo tirante. De lo cual se establece para el primer escenario un valor de Poca resiliencia, relativo a lo dañinos que puede ser los contaminantes de las urbes en adición con su cercanía a los cuerpos de agua, para el segundo escenario se establece un valor de resiliencia Moderada, relativo a la ubicación de las zonas vegetación ligera con la vegetación densa.

Dado esto, para la determinación de la probabilidad de ocurrencia para la cuenca del río Agujas se tomó en cuenta la presencia de la Reserva Forestal Golfo Dulce, por lo que estas actividades están totalmente limitadas, no obstante en este punto se vuelve importante la consideración de que la tala ilegal de árboles constituye uno de los principales problemas de la zona señalado por el Plan de Manejo de la Reserva Forestal y el PDRT, el cual se ve potenciado por factores como el desempleo, la baja escolaridad y el poco valor agregado del producto en términos económicos. Otro aspecto influyente es limitante en términos de diversidad de actividades productivas, las cuales en esta zona se centran en actividades agropecuarias, además se hace la consideración de que los caminos existentes en la cuenca son de lastre o suelo desnudo por lo que se tiene arcillas que pueden ser arrastradas a los cuerpos de agua, o que al secarse pueden dispersarse en partículas para luego terminar en los ríos producto de los eventos de precipitación.

Debido a eso, para el primer escenario se considera Poco probable, pues a pesar de tener diversos factores a favor, es muy poca la cantidad de suelo urbanizada y no se demostraron indicios de tendencia al aumento en los últimos 20 años. Por otra parte, en lo que corresponde al segundo escenario planteado se definió una valoración de Posible, debido a que en este caso existe una tendencia tenue al aumento de la vegetación ligera, sin embargo, es paulatino, debido a que la presencia de la reserva limita bastante las actividades.

En lo que corresponde a la cuenca de playa Colorada interfiere en la consideración que la principal actividad de la zona es el turismo, la cual se espera que se potencie por el aumento de visitantes a las áreas de protección cercanas, por lo que es predecible un aumento de la cobertura urbanizada, a esto se le agrega que las actividades agropecuarias están validadas por el plan regulador, la presencia de caminos de lastre y las altas precipitaciones.

Dado esto, para el primer escenario se establece que es Probable que se presenten contaminantes relativos a zonas urbanizadas o sin cobertura vegetal, pues en la cuenca se demostró la tendencia al aumento de este tipo de cobertura de suelo, además de que se espera sea el punto donde se priorice la densificación poblacional. Para el segundo escenario se establece un valor de Poco probable, debido a que en la cuenca se ve una disminución de este tipo de cobertura de suelo, aunado a que es otra la actividad predominante.

4.3 Caracterización del riesgo ambiental

La caracterización de los riesgos ambientales determinados corresponde a la clasificación de acuerdo con rangos de puntajes establecidos tal y como se muestra en la Figura 42, en el que se definieron 4 categorías de igual rango de puntos en los que se define si es riesgo alto, significativo, moderado y leve. Los cuales se caracterizan según se muestra seguidamente.

- Riesgo alto

  El riesgo alto corresponde a la mayor categoría que va desde los 28 hasta los 36 puntos, el cual corresponde a peligros que generen una repercusión crítica en el medio, con efectos irreversibles o que implican una intervención activa y persistente en el tiempo para poder tener mejoras, además que de que degrada la vida acuática, y que en campo es verificable su ocurrencia o que suceden de forma diaria. También puede tratarse de peligros catastróficos para el medio, donde es imposible la recuperación del medio, y se

produce la pérdida de la biota endémica debido al cambio total de las condiciones previas, el análisis del medio indica que es muy probable que ocurra el suceso iniciador.

Este tipo de riesgos indican que es imperante una intervención urgente en los cuerpos de agua, y que debe ser de forma inmediata, pues las consecuencias son gravísimas y pueden estar en proceso de consolidación en el medio o ya presentes. En este punto se refleja la importancia de una adecuada caracterización del medio, que permita esclarecer las condiciones actuales.

- Riesgo significativo

El riesgo significativo es para el rango de valores de riesgo entre 19 y 27 puntos, por lo que representan amenazas severas, en el que se degrada la calidad del medio y su ocurrencia es diaria, o comprobada. Asimismo, corresponde a peligros severos o críticos que sean muy probables de ocurrir según el análisis del medio, en ese sentido se categorizan aspectos que degraden severamente la calidad del agua, además que provoquen la muerte de la biota, y que las condiciones de calidad representen una amenaza a la salud pública.

Cuando se define un riesgo como significativo es necesaria una intervención activa y rápida para atender las causas de los problemas visualizados, así como las consecuencias que se estén manifestando al momento. En orden de atender un riesgo significativo, es muy importante entender las causas para poder actuar en términos de prevención, ya sea para las condiciones que se enfrenten como para la formulación de políticas de apoyo en el futuro.

- Riesgo moderado

La condición de riesgo moderado corresponde a los valores en el rango de 10 a 18 puntos, el cual representa peligros severos, pero de poca probabilidad de ocurrencia, o una combinación de peligros marginales o de gravedad moderada, pero que se consideren probables. De manera que, representan riesgos que no requieren una intervención urgente o inmediata, pero es muy importante saber de su existencia y estudiar a fondo sus causas con el fin de trabajar en mitigar los factores que acentúen su aparición, como en disminuir las causas que los definen.

- Riesgo leve

  El riesgo leve corresponde a la categoría de menor riesgo, la cual se define para los valores de 1 a 9, y corresponde a riesgos que son poco probable que ocurran, o que sus consecuencias son despreciables o marginales. No obstante, es importante identificarlos para poder reforzar las conductas que hacen poco probable su aparición, así como evaluar las causas de los problemas para evitar que se refuercen, o bien identificar si es posible su aparición en el largo plazo.

Seguidamente se muestran las matrices de caracterización de riesgo correspondientes a cada una de las cuencas.

Cuadro 58. Caracterización de riesgos por contaminación en cuerpos de agua superficiales en la cuenca del río Agujas

Riesgo	Despreciable (1)	Marginal (2)	Moderado (3)	Severo (4)	Crítico (5)	Catastrófico (6)
Cierto (6)		OD ≤ 5 mg/L DQO > 20 mg/L Colif. Fec. > 20 NMP				
Muy probable (5)				OD ≤ 4 mg/L DQO > 25 mg/L Colif. Fec. > 1000 NMP		
Probable (4)				Cont. por uso de pesticidas; Cont. por uso de fertilizantes; Cont. por vertidos de AR con alta carga orgánica; Aumento de zonas agrícolas o pastizales		
Posible (3)			Contaminación con residuos sólidos dispersos		OD ≤ 3 mg/L DQO > 50 mg/L Colif. Fec. > 2000 NMP; Cond. para el desarrollo de eutrofización	
Poco probable (2)				Contaminación con residuos no tradicionales en el cauce o riberas; Aumento de zonas urbanas o suelo desnudo		
Excepcional (1)						Condición de botadero o vertedero en el cauce o riberas

En el Cuadro 58 se presenta la matriz de riesgos para la cuenca del río Agujas, en el que destaca como mayor riesgo la contaminación por aguas residuales domésticas que generen una condición de calidad del agua tal que el OD sea menor a 4 mg/L, la DQO sea mayor a 25 mg/L y que los coliformes fecales alcancen un valor igual a superior a los 1000 NMP con una valoración de 20 puntos a la que se le asigna una condición de riesgo significativo, esta condición destaca principalmente a que se determina como una amenaza de consecuencias severas y muy probable, lo que se relaciona principalmente a las condiciones evaluadas del medio debido a los valores de DQO y OD.

Los siguientes escenarios de riesgo en puntuación son, con una valoración con 15 puntos, la condición de contaminación más grave por vertidos de aguas residuales domésticas, en el que el OD es menor de 3 mg/L, el DQO es superior a 50 mg/L y los coliformes fecales llegan a un valor de 2000 NMP, y al establecimiento de condiciones para el desarrollo de eutrofización en el cauce. Debido a los niveles de contaminación actual y la cantidad de vertidos, estas amenazas tienen consecuencias que definen un escenario crítico en el medio, a pesar de ser de posible ocurrencia, por lo que es de las condiciones que deben mantenerse en control.

Con una valoración de 12 puntos se encuentran cuatro escenarios de riesgo, que corresponden a la contaminación por uso de pesticidas, por uso de fertilizantes, por el vertido de aguas residuales de actividades ganaderas, y el aumento de zonas de zonas agrícolas o pastizales, la ocurrencia de estos cuatro escenarios con la misma valoración es esperable dado que se le atribuyen consecuencias similares para el medio y comparten sucesos iniciadores. En este caso el daño se considera severo debido a las consecuencias negativas como la degradación del medio para el desarrollo de la vida acuática, la pérdida de paisaje y zonas recreativas, no obstante, se consideran escenarios posibles debido a las condiciones actuales y las que se deben de presentar para el desarrollo de las consecuencias.

El escenario de contaminación por vertido de aguas residuales domésticas que provocan una condición de OD igual o menor a los 5 mg/L, un valor de DQO mayor o igual a 20 y los coliformes fecales sean mayores de 20 NPM también tiene una valoración de 12 puntos, en este caso se asigna el valor por tener una gravedad marginal debido a que las condiciones no propician la conservación del medio, pero no se afecta la vida acuática o el paisaje. Sin

embargo, en este caso el hecho se considera de ocurrencia certera, dado que los resultados lo reafirman en la evaluación de la calidad del agua realizada en febrero 2020 y julio 2019.

En términos generales, los escenarios relativos a la contaminación por residuos sólidos y por el cambio de uso de suelo propiciado por el aumento de zonas urbanas o suelo desnudo son los que presentan menor riesgo. Este último, es de esperar dada la baja cobertura urbana en la cuenca, aunado a que no fue posible definir que exista la tendencia de crecimiento de zonas urbanas, por lo que la probabilidad de ocurrencia se definió en poco probable, de manera que a pesar de tener consecuencias severas su puntaje es de 8.

En lo que respecta a los residuos sólidos todos se encuentran en una condición de riesgo leve, lo que indica que son aspectos a tener en control, pero no son una amenaza actualmente, la puntuación de mayor a menor es de la siguiente manera con 9 puntos se tiene cuando se trata de residuos ordinarios que se encuentran de forma dispersa se establece una gravedad moderada y una condición posible, seguidamente, con 8 puntos se encuentra la condición de contaminación por residuos no tradicionales la cual impacta severamente el paisaje y la calidad del agua, pero se considera poco probable que ocurra, finalmente la consolidación de la conformación de un botadero, a pesar de tener consecuencias que se categorizan como catastróficas para el medio, se considera que sería excepcional que suceda algo de estas dimensiones, por lo que corresponde a un riesgo leve con 6 puntos.

Esta condición de riesgo leve relativa a los desechos sólidos se asocia principalmente a la recolección semanal de residuos que realiza el gobierno local, así como a los programas de recolección de desechos no tradicionales que existen en conjunto con el Ministerio de Salud, lo que conlleva a una baja probabilidad de ocurrencia, lo que a su vez se demuestra en las visitas de campo, donde se no observaron residuos en los cuerpos de agua de la cuenca del río Agujas.

Cuadro 59. Caracterización de riesgos por contaminación en cuerpos de agua superficiales en la cuenca de playa Colorada

Riesgo	Despreciable (1)	Marginal (2)	Moderado (3)	Severo (4)	Crítico (5)	Catastrófico (6)
Cierto (6)			OD ≤ 5 mg/L DQO > 20 mg/L Colif. Fec. > 20 NMP Cont. con residuos sólidos dispersos	OD ≤ 4 mg/L DQO > 25 mg/L Colif. Fecales > 1000 NMP		
Muy probable (5)					OD ≤ 3 mg/L DQO > 50 mg/L Colif. Fec. > 2000 NMP Condiciones para el desarrollo de eutrofización	
Probable (4)				Aumento de zonas urbanas o suelo desnudo		
Posible (3)			Contaminación por vertidos de aguas residuales con alta carga orgánica	Cont. con residuos no tradicionales en el cauce o riberas Cont. por uso de pesticidas Cont. por uso de fertilizantes		
Poco probable (2)				Aumento de zonas agrícolas o pastizales		
Excepcional (1)						Condición de botadero o vertedero en el cauce o riberas

La caracterización de los riesgos ambientales identificados en la cuenca de playa Colorada se presenta en el Cuadro 59, en el cual destacan como los riesgos con mayor puntaje la contaminación de los cuerpos de agua producto del vertido de aguas residuales domésticas que produzcan condiciones tales que el OD sea igual o menor a 3 mg/L, la DQO tenga un valor superior a los 50 mg/L y los coliformes fecales sea igual o superior a los 2000 MNP, y el riesgo de la formación de condiciones para el desarrollo de eutrofización, los cuales son relativamente similares por lo que es de esperar que compartan la categorización. Estos riesgos obtuvieron 25 puntos, por lo que se clasifican como riesgos significativos, de manera que son de suma importancia y requieren una intervención pronta y activa en función de atendar las causas y reducir el impacto de las consecuencias.

Debido a que estos peligros tienen consecuencias que llevan al medio a un estado crítico, en el que se cambian las condiciones iniciales y se produce la muerte de la biota endémica, lo que conlleva pérdida significativa en términos ambientales, a lo que se le suman consecuencias como la pérdida de espacios recreativos, la generación de malos olores, la pérdida del aprovechamiento del agua, entre otros. En este sentido, se hace relevante que la probabilidad de ocurrencia asignada es de muy probable, lo que indica que los peligros evaluados son habituales en el medio, y sus consecuencias son problemas más arraigados al tejido social, lo que los hace sumamente peligrosos.

El siguiente peligro con mayor puntuación es la generación de condiciones de calidad del agua en las que el OD sea menor a 4 mg/L, el DQO sea igual o mayor a 25 mg/L, y los coliformes fecales superen 1000 NMP, el cual tiene una puntuación de 24 debido a que las consecuencias asociadas se consideran severas para el medio por la degradación de la vida acuática, la alta peligrosidad asociada, así como la posibilidad de extensión de los contaminantes. Aunado al hecho de que esta amenaza se considera como cierta, debido los resultados obtenidos en la evaluación de calidad de agua realizada en las giras de julio 2019 y febrero 2020. Como es de esperar, el tercer escenario de contaminación por vertido de aguas residuales domesticas que es de menor gravedad, se califica como de consecuencias moderadas, y de probabilidad cierta por lo que su calificación es de 18 puntos, indicando un riesgo moderado, no obstante, esta condición no es tan relevante, pues su sucesora es cierta igualmente.

Seguidamente, el peligro asociado a contaminación por desechos sólidos dispersos en el cauce de las quebradas o en sus riberas, corresponde al siguiente con mayor puntuación. Su

valoración es de 18 puntos, que se asignan por la consideración de que sus consecuencias son moderadas y que es un suceso cierto, pues en las vistas de campo fue posible la identificación de residuos en las riberas de las quebradas, principalmente en la quebrada de El Mono. La valoración de 18 puntos corresponde a un riesgo moderado, por lo que es relevante hacer evaluaciones de estrategias que permitan sobre todo atacar las causas del problema.

El siguiente peligro con mayor categorización es la contaminación relacionada con el aumento de zonas urbanas o de suelo desnudo en la cuenca, a la que se le asignaron 16 puntos por lo que corresponde a una categoría de riesgo moderado. Esto debido a que se le asocian consecuencias severas, principalmente relacionadas con la erosión y arrastre de contaminantes, y se categoriza como un suceso probable, el cual además fue posible demostrar una tendencia de crecimiento tomando como referencia un periodo de 20 años. Esto implica la existencia de la necesidad de mantener controles del crecimiento urbano, las zonas donde se intensifica y los patrones de movilidad.

Con 12 puntos se encuentran tres amenazas a las que se les asocian características severas en un escenario de posible ocurrencia, estas son la contaminación por residuos no tradicionales en el cauce o riberas, contaminación por el uso de pesticidas y por el uso de fertilizantes. Las dos últimas están directamente relacionadas con las actividades agrícolas, por lo que la condición de posible está relacionada con la baja actividad agrícola identificada en la cuenca, a pesar de ser una actividad permitida en el plan regulador, es por esto por lo que a pesar de ligársele consecuencias severas para el ambiente su condición actual es de riesgo moderado. Por otra parte, en lo que refiere a la contaminación por residuos no tradicionales, estos afectan la calidad del agua, la vida acuática, el paisaje y sus consecuencias son difíciles de remediar, por lo que se deben evitar, además por el hecho de ser promotores de la acumulación de desechos.

Siguiendo en la misma línea de poca actividad agropecuaria que se ha identificado en la zona, se señalan los siguientes peligros de contaminación por vertidos de agua con alta carga orgánica proveniente de ganaderías y el aumento de zonas agrícolas o pastizales en la cuenca, con valoración de 9 y 8, respectivamente. Por lo que ambos riesgos se definen como riesgos leves, los cuales no representan una amenaza directa a la calidad del agua en este momento, no obstante, es conveniente mantener monitoreados los cambios que puedan darse,

principalmente en el sector este de la cuenca, donde predomina la cobertura vegetal densa y se encuentra más alejado del centro de Drake.

Finalmente, el último escenario corresponde a la consolidación de las condiciones para que se desarrolle un botadero en o cerca del río, esta consecuencia, al igual que para la cuenca del río Agujas, se consideran sus consecuencias como catastróficas para la calidad del agua y para el ambiente en general, incluso afecta las dimensiones sociales y económica. No obstante, dado los servicios de recolección de desechos que se realiza en la zona, esta amenaza se clasifica como excepcional, por lo que su valoración es de 6 puntos y se considera un riesgo leve.

CAPÍTULO 5. RECOMENDACIONES DE LOS RIESGOS AMBIENTALES IDENTIFICADOS

La evaluación de riesgos ambientales permite la identificación, categorización y análisis de los riesgos que corresponden al escenario definido, y en este caso para el factor específico del agua de los cuerpos de agua superficiales, por lo que cual es posible definir recomendaciones en ese sentido.

5.1 Recomendaciones generales

El procedimiento de análisis de riesgos ambientales permite establecer un panorama más amplio de las condiciones reales de la zona, de manera que es posible definir recomendaciones tanto generales como específicas de la zona de estudio.

Según el análisis de los árboles de fallos, se puede notar que la falta de educación ambiental aunado a un faltante sentido de pertenencia es uno de los principales desencadenantes de los sucesos iniciadores, por lo que es necesario evaluar los programas de estudios con el fin de encontrar puntos de mejora que permitan crear una cultura ambiental más responsable, para lo cual es necesario un estudio más a fondo de los temas a evaluar y la mejor manera de incorporarlos. En este mismo sentido es importante estudiar las metodologías que permitan generar un mayor sentimiento de pertenencia a las generaciones jóvenes, aunado a ampliar la perspectiva de la importancia biológica, cultural e histórica que representa la Península de Osa para el país. En este punto, es de suma importancia el trabajo articulado con el Ministerio de Educación y las juntas directivas de los centros educativos.

En ese mismo sentido, la evaluación de las causas iniciales muestra que la falta de coordinación entre los principales actores sociales con las entidades gubernamentales y el gobierno local de Osa, que deben estar presentes, influye en la intensificación o el surgimiento de diferentes problemas, y finalmente una de sus manifestaciones es la contaminación de los cuerpos de agua. Concretamente, un ejemplo es el poco acompañamiento que denuncian los productores locales en el uso y mejora de técnicas de las actividades agropecuarias, o la deficiencia de infraestructura de saneamiento que permita el desarrollo sostenible de Drake y su impulso como centro turístico. Por lo que se recomienda mejorar e intensificar las relaciones entre los distintos actores sociales, ONG´s y los entes gubernamentales correspondientes tales como el

Ministerio de Agricultura y Ganadería, Instituto Costarricense de Turismo y el Ministerio de Ambiente y Energía aprovechando las condiciones favorables que implica la presencia del corredor biológico en la cuenca de playa Colorada y la parte baja de la cuenca del río Agujas. Asimismo, desde el municipio de Osa aumentar su participación e intervención, así como la inspección del cumplimiento de la normativa correspondiente.

Un corolario de lo mencionado anteriormente, que es lo que también denuncia el PDRT, es la falta de capacitación a la población en temas que sean relevantes para la zona, de manera que potencien las capacidades de los habitantes en función de las características específicas de la región. Pues esto permite mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles, incentiva a la población joven a participar en las actividades productivas de la zona, además de ayudar a su progreso. Aunado a esto, se refuerza la aplicación de las mejores prácticas que limiten las fuentes de contaminación en busca del desarrollo sostenible que es de suma importancia. En ese sentido se sugiere explorar las posibilidades de incorporar educación técnica en secundaria para la zona, lo que podría tener muchos beneficios para la población al no verse obligados a emigrar para tener mayor educación fuera del bachillerato. Para esto es relevante el papel del Ministerio de Educación al ampliar y mejorar los planes de estudio, también se puede considerar la colaboración con instituciones de enseñanza superior del país o el Instituto Nacional de Aprendizaje.

En adición, el proceso de definición del estado actual del escenario de exposición demuestra el escaso registro de información existente, en términos demográficos, de uso de suelo, de actividades productivas realizadas y de calidad de los cuerpos de agua, lo que dificulta enormemente el proceso de toma de decisiones en el sentido de qué intervenciones son más pertinentes, o que aspectos positivos se pueden reforzar. De modo que se recomienda, en lo que corresponde a calidad del agua, continuar las pruebas y en la medida de lo posible aumentar la cantidad en función de los problemas identificados, para lo que se sugiere pruebas de metales, y clorofila. Lo cual permitirá tener una mayor claridad del panorama tanto de forma temporal como espacial, para esto se sugiere la coordinación con el Ministerio de Salud, para ejercer los controles sanitarios correspondientes, asimismo de ser posible buscar apoyo en un trabajo conjunto con universidades, MINAE y SINAC. Además, en los casos que corresponda, para los aprovechamientos y vertido de aguas residuales considerar la responsabilidad de la Dirección de Aguas.

De igual forma se recomienda generar información demográfica que sea específica del distrito de Bahía Drake, pues actualmente es muy poca la existente y es necesario tener datos con el fin de tomar las mejores decisiones para la región, además de que en su mayoría esta desactualizada, y como se presentó en la sección de uso del suelo, se han dado importantes cambios en la zona en las últimas dos décadas, los cuales se han intensificado en los últimos años. Por ejemplo, en lo que respecta a la calidad del agua, es conveniente conocer la cantidad de viviendas existentes, así como el tipo de saneamiento que cada una utiliza, la forma en la que depositan los desechos sólidos, y si estuviesen dispuestos a reciclar, entre otros. Para lo cual es importante una planificación activa desde el gobierno local, así como los datos que puedan ser generados por el Instituto Nacional de Estadística y Censos.

En esa línea, se recomienda la aplicación de esta metodología de evaluación de riesgos ambientales de forma periódica en el escenario de exposición para el que se sugiere un periodo de 3 a 5 años, con el fin de identificar los cambios que se han dado además de actualizar la lista de amenazas que se atribuyen a las cuencas. Aunado a esto, se recomienda la incorporación de indicadores socioeconómicos como el desempleo, pues permitirán ampliar el panorama existente del escenario de exposición. La aplicación periódica de la metodología permite reconocer si las medidas tomadas son las adecuadas, por lo que se pueden definir recomendaciones con más claridad y posiblemente mayor efectividad.

5.2 Recomendaciones para la cuenca del río Agujas

De manera más específica, se indican las recomendaciones pertinentes a la cuenca del río Agujas según los resultados de la caracterización de riesgos realizada. Para esto, el riesgo con mayor puntuación identificado corresponde al vertido de aguas residuales domésticas que contengan gran cantidad de materia orgánica, por ende, disminuyan el oxígeno disuelto además de la presencia en niveles peligrosos de coliformes fecales, en este caso se tomará en general desde el punto de vista del suceso iniciador y no en rangos específicos de los parámetros como se presentó anteriormente, para lo cual inicialmente se recomienda realizar pruebas de calidad del agua de forma periódica con el fin de establecer un panorama más amplio, que permita definir el problema con más certeza, pues en este caso se tiene valores altos de DQO y mediamente altos de coliformes, aunado a bajos valores de OD principalmente cerca de la desembocadura, pero es recomendable tener más datos para definir el estado de contaminación de los cuerpos de agua.

Dado que los niveles de contaminación se atribuyen a descargas de aguas residuales, se recomienda definir una ruta de abordaje a los planes de muestreos a futuro mediante la cooperación con el Ministerio de Salud en lo que respecta a la calidad de los cuerpos de agua, asimismo, del SINAC y el MINAE. En esa misma línea se recomienda buscar la presencia de la zona en el proyecto "Sistema Nacional de Información para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (Sinigirh)," de la Dirección de Aguas, el cual pretende levantar una línea base con la información relativa a la calidad de los cuerpos de agua superficiales del país.

En ese mismo sentido, dado que se sabe que el pueblo de Los Planes y las casas más aisladas que se encuentran en la cuenca no cuentan con un sistema de saneamiento colectivo además de las grandes distancias que se tienen entre viviendas, se recomienda estudiar un sistema de saneamiento individual que pueda ser empleado, y que se adapte a las condiciones climáticas, del tipo del suelo y sociales, tal que pueda ser una solución moderadamente sencilla de implementar y permita reducir la contaminación por aguas residuales. El estudio sugerido también implica el análisis del uso de sistemas de saneamiento individual de forma específica para las aguas grises producidas, o si todas las aguas residuales pueden tratarse en conjunto.

Es importante que los sistemas de saneamiento a implementar cumplan con el Reglamento de disposición al subsuelo de aguas residuales ordinarias tratadas, en el cual es relevante considerar las pendientes de la zona y si estas son compatibles con los tanques sépticos normalmente empleados. Asimismo, de parte del gobierno local que se mejoren los controles en la construcción de los elementos sanitarios, además de fomentar las prácticas adecuadas de operación y el mantenimiento frecuente de las unidades. Además, se puede evaluar la posibilidad de utilizar sistemas de saneamiento individual mejorados, y también las prácticas adecuadas de reúso de aguas residuales.

Aunado a esto, para la zona de la cuenca baja del río Agujas, cerca de la desembocadura se recomienda ampliar los estudios relativos específicamente al desarrollo de condiciones de eutrofización, pues a pesar de que para este caso los resultados de riesgo indican una categoría de riesgo moderado, las condiciones favorecen el establecimiento de esta condición. Por lo que, se sugiere utilizar modelos más específicos que consideren variables como el fósforo total, la clorofila, ubicación, profundidad del cuerpo de agua, entre otros, estos modelos ya existen y es necesaria la evaluación de cual se apega más a las condiciones del medio para ser usado.

El siguiente escenario de riesgo que se presenta, son los relacionados con las actividades agropecuarias que se realizan en la zona, para lo cual se considera la contaminación por pesticidas, fertilizantes, y aguas residuales de ganadería. En este caso el riesgo asociado es de categoría moderada, por lo que se recomienda ampliar los estudios inicialmente de las actividades, para lo cual es importante identificar específicamente los sitios donde se desarrollen actividades agropecuarias, específicamente qué se hace y el volumen que se maneja en cada en m^2 o en cantidad de ganado, y si se encuentran debidamente inscritos ante el ministerio correspondiente.

Además, se sugiere continuar con las pruebas de calidad de agua relacionadas a agroquímicos, y las pruebas de DQO, DBO, donde los puntos de muestreo se definan en función de la ubicación de los puntos de producción más densificados y la topografía del sitio, de modo que se pueda definir el impacto de las actividades en los cuerpos de agua, o si bien el medio es capaz de auto depurarse de los contaminantes. Esta actividad se sugiere se aborde desde el Ministerio de Salud como parte de los controles de los permisos que se deben haber otorgado.

En esa misma línea, se tiene el riesgo de contaminación por el cambio de uso del suelo relacionado a el aumento de espacios para el desarrollo de actividades agropecuarias, o suelo desnudo, relativo principalmente al arrastre de sedimentos. El cual se considera un riesgo moderado, por lo que en este caso se recomienda mantener un control periódico, de sugerencia al menos cada 2 años, en el que se evalúe cómo ha sido el cambio del suelo, y si los patrones de cambio definido se intensifican o por el contrario se desaceleran, pues esto será un importante indicador de las condiciones esperadas. En adición con lo mencionado anteriormente, se sugiere hacer una corroboración de los sitios en los que se señala la presencia de vegetación ligera o suelo desnudo, con el verdadero uso del suelo de la zona.

Consecuentemente, un aspecto que es señalado en diferentes informes, y se considera que deben tomarse medidas concretas al respecto es referente a la explotación ilegal maderera que amenaza principalmente en el territorio de la Reserva Forestal de Golfo Dulce, según denuncia el SINAC, para la cual es necesario estudiar más a fondo las causales reales del problema y los principales involucrados, aunado de establecer las consecuencias actuales relativas a este problema. Además de esto, se debe realizar un esfuerzo interinstitucional para mejorar la articulación entre los diferentes actores, y establecer una metodología de intervención que permita tomar acciones concretas al respecto, por ejemplo, el fortalecimiento del programa de

pago por servicios ambientales, el cual señala el PDRT que es un programa rezagado en la zona.

En esa misma línea, el Plan de Desarrollo Rural Territorial denuncia la presencia de actividades de extracción ilegal de oro tanto dentro como fuera de la Reserva Golfo Dulce, por lo cual se recomienda la ampliación del estudio de contaminantes producto de esta actividad en los distritos de Sierpe, Drake, Puerto Jiménez, además del abordaje integral de la problemática con el fin de definir las causas reales, las consecuencias del problema, y establecer un plan de manejo que permita tomar acciones al respecto. Para lo cual es importante la intervención de las autoridades competentes como el MINAE y el SINAC.

Finalmente, los problemas con menor categorización son los relacionados con la presencia de residuos sólidos, debido a que en las visitas de campo no se identificó la presencia de alguno cercano a los cuerpos de agua, o en los caminos. Por lo que el riesgo relacionado es moderado para residuos ordinarios y leve para no tradicionales, o para la presencia de una condición más adversa como lo es la presencia de un botadero a cielo abierto. En este caso la sugerencia es en el caso del gobierno local, que se procure dar cobertura completa a las viviendas, o bien se definan estrategias flexibles que permitan la recolección total de residuos, como por ejemplo que se definan puntos de recolección colectivo, además de procurar extender programas de reciclaje que permitan reducir la cantidad de residuos y ser aprovechados en un modelo de economía circular, para lo que se sugiere la cooperación en un modelo público-privado que permita el aprovechamiento de los residuos valorizables.

Es importante mencionar, que tanto esta como otras de las recomendaciones implican el trabajo conjunto de los distintos actores de la comunidad, por lo que es necesario en el marco de búsqueda de mejores condiciones de calidad de agua, incentivar las relaciones que permitan reconocer las necesidades de las comunidades y plantear rutas de acción en función del bien de la población y la protección del medio ambiente. Para lo cual es de suma importancia aprovechar todos los recursos disponibles, como el plan regulador, o los datos de calidad de agua generados, para trabajar e identificar los faltantes de información que pueden ser llenados.

5.3 Recomendaciones para la cuenca de las quebradas de playa Colorada

En lo que respecta a las condiciones específicas para la cuenca de playa Colorada, los resultados indican que los mayores riesgos, categorizados como significativos, son los relacionados a los vertidos de agua residual de tipo doméstica, las cuales disminuyen el oxígeno disuelto y afectan las condiciones del medio y la vida acuática endémica, por lo que se recomienda ampliar los estudios de calidad del agua en las quebradas en este sentido, con el objetivo de tener mayor información de la variación temporal de la calidad del agua y de ser posible del caudal de estas. Al igual que para la cuenca del río Agujas, se recomienda un abordaje mediante el gobierno local, el Ministerio de Salud, el MINAE y el SINAC, así como desde la Dirección de Aguas. Asimismo, aprovechar la condición de corredor biológico, cercanía a áreas del sistema de conservación y su ubicación estratégica, entre otros factores, para buscar futuros proyectos que se interesen en reforzar el análisis en la zona.

En ese mismo sentido se recomienda ampliar la información geoespacial que se tienen de las quebradas, con el fin de establecer de forma precisa su inicio, fin y ramificaciones, pues estas quebradas son de suma importancia en la cuenca, dado que son los cuerpos receptores de todas las aguas residuales que se produzcan en la cuenca y estas desembocan en una playa importante para la zona. Principalmente para la quebrada El Mono, la cual como se presentó es pequeña, bastante rectilínea, sin ramificaciones, y es el único cuerpo receptor para las aguas residuales de las actividades que se realizan en Drake, el cual el plan regulador indica como el punto a densificar, además que al ser una cuenca exorreica la afectación a la zona costera es directa.

En esa misma línea se recomienda estudiar la capacidad de utilizar un sistema de saneamiento colectivo para las viviendas, dado que la ASADA de Drake reporta la presencia de 204 usuarios y se sabe de más viviendas que no utilizan el agua de la ASADA, o bien, la opción de sistemas mixtos, de menor tamaño que puedan ser empleados para un conjunto considerable de viviendas, cabinas, hoteles y comercios en general, dependiendo de variables como el espacio disponible, la capacidad de mantenimiento, la pendiente del terreno, la concentración y cantidad de los caudales producidos, el clima de la zona, el tipo de suelo, las características de la población, y las opciones actualmente disponibles, entre otras. Asimismo, se extiende la recomendación de considerar utilizar el sistema de biojardineras, como complemento a los

tanques sépticos existentes en caso de tener el espacio disponible, dado que son sistemas y bajo costo y eficiencia considerable.

En conjunto con lo anterior, se hace la recomendación a la ASADA de mantener un registro automatizado de los consumos, tanto del tipo de usuario como del caudal mensual, con el fin de obtener un patrón de consumo que pueda ser asociado a la generación de aguas residuales, de tal forma que se pueda priorizar las intervenciones requeridas y establecer mejores controles de la situación actual, esto en tiempo real y sin tener que procesar la información con la que se dispone en el momento.

El siguiente riesgo de mayor puntuación identificado corresponde a los contaminantes relacionados con el aumento de zonas urbanas o de suelo desnudo en la cuenca, el cual se caracteriza como un riesgo moderado. En este caso, la principal razón que potencia la calificación del riesgo es su alta probabilidad de ocurrencia relativo a la tendencia de expansión de la zona urbana que se identificó según el análisis de uso del suelo realizado. No obstante, el crecimiento se encuentra dentro de la zona definida por el plan regulador de Osa para el desarrollo de actividades turísticas de bajo impacto. Por lo que se sugiere la supervisión y acompañamiento del proceso de expansión por parte del gobierno local, de manera que se densifique de forma localizada, pues esto facilita el suministro de servicios básicos y disminuye la expansión del área urbanizada, bajando los costos operativos y aumentando la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos.

Aunado a esto, dado que el turismo es la principal actividad productiva de la zona en la que participan más del 50 % de la población de Drake, se sugiere aumentar la capacitación de la población en esta línea, de manera que se aprovechen de forma eficiente los recursos disponibles en el medio, y asimismo se disminuya el impacto en la zona. En este caso, se hace clara la necesidad de mejorar los programas disponibles para la población, así como las estrategias actuales para llegar a los habitantes, y que esto se haga de forma conjunta entre gobierno y locales, así como solicitar el acompañamiento del Ministerio de Educación, el Instituto Nacional de Aprendizaje, y el Instituto Costarricense de Turismo. Además, en este punto es muy importante considerar la población joven que necesita insertarse al medio productivo, y requiere las herramientas y espacios para hacerlo.

En lo que corresponde al suceso iniciador de cambio del uso del suelo, el escenario mencionado anteriormente es el que necesita más atención, pues en el caso de los riesgos asociados a el aumento de zonas para uso agropecuario o pastizales tiene una categoría leve debido a que este tipo de cobertura de suelo por el contrario se ha disminuido en los últimos años. Por lo que la sugerencia es mantener la inspección del cambio de uso de suelo, principalmente en el sector este de la cuenca de la quebrada Don Carmen, en la cual es donde hay mayores posibilidades de ampliación de estas actividades, además de que en este momento la cobertura de esta cuenca es primordialmente de vegetación densa y sana, para lo que se sugiere el acompañamiento conjunto con pruebas de calidad del agua en esta línea. Lo cual requiere la participación del gobierno local de Osa, así como del acompañamiento de instituciones como el Ministerio de Salud y el SINAC, con el fin de aprovechar el espacio y las condiciones que ofrece la cuenca de forma sostenible.

Seguidamente, el riesgo relacionado con la presencia de residuos ordinarios y no tradicionales en las quebradas o cercanías se les asigna una categoría de riesgo moderado, los cuales corresponden al siguiente riesgo en términos de puntuación. En este caso, en lo relativo a los residuos ordinarios, se reconoce el esfuerzo y avance que implica la recolección de residuos en las viviendas. Sin embargo, se sugiere ampliar las posibilidades relacionadas con el reciclaje de residuos, pues es beneficioso a la comunidad dado que los desechos reciclables tienen un valor monetario y pueden ser incluidos en un sistema de economía circular que permita su aprovechamiento, por lo que se sugiere al gobierno local buscar como referencia algunas experiencias exitosas de colaboración entre la empresa pública y privada para el incentivo del reciclaje. Además, se sugiere evaluar la capacidad de incorporar la limpieza de vías y puntos estratégicos en el centro de Drake por parte del gobierno local al ser un poblado que se ha consolidado en los últimos años.

En lo que corresponde a los residuos no tradicionales es significativo señalar la importancia del trabajo realizado por el gobierno local en conjunto con el Ministerio de Salud relativo a las campañas de recolección de residuos no tradicionales. Lo cual es uno de los aspectos que se recomiendan fortalecer, y mantener principalmente relacionado al efecto visual que tienen los residuos no tradicionales, que afectan el paisaje de manera que en muchas ocasiones la presencia de uno o varios, es considerado por individuos con poca cultura ambiental como una indicación de que ese es un sitio apto para colocar los desechos, de modo que se genera un

patrón de acumulación que de no intervenirse de forma inmediata puede tener consecuencias permanentes y significativas para la calidad del agua y del medio en general.

En lo que concierne a los escenarios de riesgos relacionados con la generación de residuos sólidos ordinarios, se tiene el de la consolidación de un botadero cerca del cauce de las quebradas, el cual se categoriza como un riesgo leve debido principalmente a que en la comunidad se da la recolección de residuos sólidos por parte del gobierno local. De manera que es muy poco probable la fijación de esta condición, además la cercanía de las quebradas a la población hace que esta esté más al tanto de los cambios que ocurran en las quebradas, principalmente relacionado con las externalidades negativas tales como los malos olores y la inminente proliferación de vectores. Para lo cual la recomendación es mantener las políticas positivas que se mencionaron anteriormente, y no descuidar la importancia de la gestión integral de los residuos sólidos.

Por otra parte, los riesgos relacionados con las actividades agropecuarias se categorizan en un menor rango, de manera tal que la contaminación por pesticidas y fertilizantes se considera como moderada y por aguas residuales de ganadería como leve. Lo cual se relaciona con la disminución de las zonas de vegetación ligera en la cuenca para abrir espacio a las zonas urbanizadas y la poca presencia actual de estas actividades. De modo que se sugiere mantener controles sobre el cambio del uso del suelo, así como la actualización de la información de cuáles son los productores de la zona actualmente, sus características principales, y si están inscritos ante el respectivo ministerio.

En adición, dado el estudio de la zona se recomienda indagar más a fondo las condiciones en las que se desarrolla la presencia de las tomas de agua en las cercanías de la quebrada El Mono, debido a que este aspecto queda fuera del rango de evaluación, pues no se considera como un contaminante. No obstante, es importante conocer su procedencia y si están debidamente inscritas. Lo cual es relevante debido a que el caudal observado era muy poco, de modo que la extracción de agua puede producir estrés hídrico además de que los resultados de las pruebas de calidad del agua señalan que esta está contaminada y es muy peligroso su consumo sin tratamiento, a lo que se le suma el debilitamiento de la ASADA local, entre otros efectos negativos.

Para esto es necesario determinar si las captaciones observadas cuentan con la respectiva concesión de agua, por medio de la Dirección de Aguas. De no ser de esta manera es necesaria la intervención por parte del Ministerio de Salud y el Instituto de Acueductos y Alcantarillados, por los riesgos a la salud que implica tener agua sin el respectivo tratamiento. Además de la importancia de fortalecer el sistema de acueducto actual de la ASADA.

Finalmente, en la cuenca de playa Colorada, y específicamente para la localidad de Drake es necesario el trabajo conjunto de la comunidad para buscar mejores condiciones de desarrollo que les permitan preservar los recursos naturales actuales y el atractivo de la zona, pero que se propicie un desarrollo integral que beneficie a sus habitantes. En este punto es relevante el apoyo del gobierno local para definir políticas que mejoren las condiciones actuales, como lo es la atracción de inversión externa, pero que a su vez se construyan y fortalezcan las bases de un desarrollo sostenible, para lo cual es necesario la mejora y mantenimiento de caminos, mantener la recolección de residuos, insistir en la búsqueda de soluciones para las aguas residuales de la zona, buscar inversión para espacios recreativos seguros, lo que se verá a su vez reflejado en mejores indicadores de desarrollo, y debe de ir acompañado indudablemente por capacitación técnica en función de las actividades de la zona y en temas ambientales.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La evaluación de riesgos ambientales relativo a la contaminación de cuerpos de agua superficiales para las cuencas del río Agujas y las quebradas de playa Colorada permitió inicialmente establecer un panorama más claro de las condiciones actuales tanto de la calidad de los cuerpos de agua, como de aspectos territoriales y socioeconómicos. Lo cual se utilizó como insumo para la definición de los riesgos ambientales específicos para cada cuenca, por medio del empleo de la metodología propuesta, la cual se basa en la UNE 150008 del Gobierno de España y diversa bibliografía consultada.

Mediante este proceso se logró concluir que para la cuenca del río Agujas los mayores riesgos provienen del vertido de aguas residuales en los cuerpos de agua, esto principalmente relacionado a su alta probabilidad de ocurrencia, la afectación implica la reducción del oxígeno disuelto en agua, y es perjudicial tanto en términos estéticos, salubres, como de importancia para la vida acuática. Lo que, a su vez se reafirma con los altos niveles de DQO, a pesar de tener puntos con baja salinidad. No obstante, este corresponde a un escenario de riesgo con consecuencias pasivas, dado que la calidad del agua del río todavía no demuestra el desarrollo completo de las posibles consecuencias asociadas a este riesgo.

Aun así, se logró determinar que actualmente se da un impacto negativo sobre el río Agujas, a pesar de que la actividad urbana de la zona de estudio es aún baja con respecto al área total de la cuenca. Dado que, al aumentar la cantidad de asentamientos urbanos sin la debida planificación y medidas de contención respectivas, es esperable que estos impactos se intensifiquen, lo cual a su vez se plantea como una amenaza para el futuro de no mejorarse la planificación por parte del gobierno local.

Seguidamente, cuatro escenarios de riesgo comparten la siguiente mayor categorización de riesgo en la cuenca del río Agujas, los cuales son: el aumento de zonas agrícolas, la contaminación por uso de fertilizantes, el uso de pesticidas, y por el vertido de aguas residuales de ganadería. Lo cual produce el arrastre de sedimentos, fertilizantes y demás agroquímicos utilizados en la actividad productiva, además de contaminantes con alta concentración de materia orgánica. Este resultado se relaciona principalmente a la tendencia de aumento de zonas de vegetación ligera y plantaciones definidas mediante el estudio de uso de suelo realizado, entre otros factores, tal como que esta corresponde a una de las principales

actividades realizadas en la zona y se encuentra dentro del plan regulador para el cantón. Aunado a esto, se suma las terribles consecuencias para la calidad del agua que representan los fertilizantes, insecticidas y demás agroquímicos a la calidad del agua.

Además, la matriz de caracterización de riesgos creada para la cuenca del río Agujas indica la concentración de riesgos en la categoría de posible ocurrencia para consecuencias que pueden causar un efecto crítico en el medio. De manera que se concluye la importancia de mantener controles sobre estos escenarios, pues su probabilidad de ocurrencia se define según las condiciones actuales, no obstante, un cambio en el medio puede producir que se concreten los riesgos señalados. Esos escenarios de riesgo corresponden a la fuerte contaminación producto de vertido de materia orgánica proveniente de aguas residuales, que lleve el oxígeno disuelto a niveles alarmantes, y el establecimiento de condiciones para el desarrollo de eutrofización, lo que respalda las recomendaciones de mantener controles de calidad en los cuerpos de agua.

Aunado a esto, de la matriz de riesgo se puede extraer que se relacionan niveles de contaminación marginales al río Agujitas, los cuales indican la contaminación por aguas residuales con materia orgánica y la presencia de patógenos relativos a niveles de coliformes fecales por encima de 20 NMP, lo que conlleva a la pérdida de la capacidad del cuerpo de agua de fungir como fuente para la conservación del equilibrio natural de las comunidades acuáticas.

Seguidamente, en lo que corresponde a la cuenca de las quebradas de playa Colorada existen dos escenarios de riesgo a los que se les asigna la mayor puntuación, que corresponden a el estado más severo de contaminación por aguas residuales planteada y la consolidación de condiciones para el desarrollo de eutrofización en los cuerpos de agua, esto principalmente relacionado en la parte baja de las cuencas. Lo cual se debe a las devastadoras repercusiones de la eutrofización del agua y también los efectos nocivos que tienen altos valores de DQO, además de los efectos negativos al medio, como la pérdida de espacios recreativos o la proliferación de malos olores. Aunado a que se consideran eventos de muy probable ocurrencia, dadas las condiciones geomorfológicas, de calidad del agua, e incluso vertidos de agua residuales que fueron identificados.

El siguiente escenario, es precisamente el vertido de aguas residuales domésticas a los cuerpos de agua, que genera consecuencias severas al medio, pero no lo llevan a un estado crítico como en el caso mencionado anteriormente. Al cual se le asigna un alto riesgo debido a que

en la evaluación de campo fue posible la identificación de diversos vertidos de aguas residuales a las quebradas, aunado a que la evaluación de la calidad de agua indica que la contaminación por materia orgánica y de materia fecal designados para el segundo y primer escenarios relativos a los vertidos de agua residual ya han sido alcanzados en los cuerpos de agua. Los que tienen como principales repercusiones que se sugiere evitar actividades recreativas de contacto primario, no se recomienda su uso para riego o acuacultura, y los valores de OD son una amenaza para algunas especies acuáticas.

Aunado a lo anterior, la matriz de riesgos de la cuenca de playa Colorada indica una importante concentración de escenarios en el área central, lo que muestra la existencia de diversos riesgos con consecuencias severas para el medio que se consideran como posibles o probables, lo cual es una situación de cuidado pues la probabilidad de ocurrencia se relaciona con las condiciones actuales, de manera que cambios en el medio puede modificar la tendencia asignada e incurrir en afectaciones reales. Lo que demuestra la importancia de las recomendaciones de vigilancia en diversos parámetros, o medidas concretas, lo cual se basa en los árboles de fallo presentados.

Uno de esos escenarios es la contaminación relativa a el aumento de zonas urbanas o de suelo desnudo, el cual se categoriza como un suceso probable dado que la evaluación del escenario de exposición demuestra la tendencia al aumento de ese tipo de cobertura de suelo, dada la expansión de Drake principalmente en los último 10 años, y además se respalda en el aumento de visitantes a las Áreas Silvestres Protegidas cercanas a la comunidad. De manera que es relevante la recomendación en especial para esta cuenca de mantener atención en los cambios de uso de suelo, principalmente alrededor de la carretera de lastre que cruza el centro que es donde se ha visto el fortalecimiento de la tendencia en el aumento de zonas sin vegetación.

En este sentido es relevante la mención de la importancia que tiene la cuenca de playa Colorada, a pesar de su poca extensión en ella se desarrolla el principal foco de crecimiento urbano de la zona lo cual se incentiva en el plan regulador, además de la concentración de actividades relativas a el turismo rural, la cual es la principal apuesta de desarrollo en la zona por lo que se espera el crecimiento de la actividad, a lo se le suma su punto estratégico y los servicios que ofrece. Por lo cual, es de igual importancia la conservación del medio que garantice un desarrollo sostenible de Drake.

Continuando con lo indicado en la matriz de riesgos de la cuenca de playa Colorada, se puede concluir la baja influencia de contaminantes relativos a actividades agropecuarias, tal que la contaminación por uso de pesticidas y fertilizantes se considera posible, y el aumento de zonas agrícolas o pastizales poco probable, pues el estudio de la zona demuestra que este tipo de cobertura presenta la tendencia a disminuir desde aproximadamente los últimos 10 años, para dar paso a suelo urbanizado. No obstante, en este estudio se demuestra cómo se ha mantenido sin cambios abruptos la cobertura de suelo en el sector este de la cuenca de playa Colorada, en el que actualmente el suelo predominante es de cobertura vegetal densa, por lo que esta es una zona de gran relevancia, en la que se extiende la sugerencia de mantener monitoreados los cambios de cobertura de suelo.

Otro aspecto relevante de la matriz de riesgos ambientales de playa Colorada es que la contaminación por residuos sólidos ordinarios dispersos se considera una condición cierta, definido a partir de las visitas de campo realizadas. El cual se presenta como un peligro de gravedad moderada, pero que deber ser intervenido de forma expedita. No obstante, la información que señalan el árbol de fallo respectivo indica que no es un problema sencillo de tratar, por lo que se hacen diversas recomendaciones en función de la gestión integral de los residuos sólidos y educación de la población.

Dado lo anterior, es importante distinguir la relación que tienen los resultados del proyecto con lo planteado en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) emitidos por las Naciones Unidas, en los que cabe mencionar que Costa Rica se comprometió a trabajar en la implementación de esta agenda para el 2030. Esto debido a que la metodología empleada permite una delimitación clara de los problemas, tal que es factible determinar un posible origen y consecuencias de forma cuantitativa, lo que conlleva a definir recomendaciones y líneas de acción más claras y eficaces. De forma más específica, este proyecto busca colaborar con los objetivos: 3 Salud y bienestar, 4 Educación de calidad, 6 Agua limpia y saneamiento, 8 Trabajo decente y crecimiento económico, 11 Ciudades y comunidades sostenibles, 12 Producción y consumo responsables, 14 Vida submarina y 15 Vida de ecosistemas terrestres.

En lo que respecta a la metodología, Los árboles de fallo son herramientas muy útiles en el proceso de análisis de escenarios de riesgo, los cuales al analizarlos en conjunto se concluye que muchos de los sucesos iniciadores determinados son problemas sistemáticos de la zona, lo cual demuestra el complejo entretejido social de la región y décadas de carencias en

desarrollo, donde incluso muchos de los problemas denunciados desde la década de 1980 son los mismos que se encuentran en los diagnósticos de la zona de los últimos años. Un ejemplo de esto es que los distritos de Sierpe-Drake y luego Bahía Drake han estado en el último quintil de desarrollo según los IDS desde el 2001 hasta el 2017, último año en el que se realizó el estudio.

Algunos de estos problemas sistemáticos denunciados son los bajos niveles de escolaridad, lo que conlleva poca educación ambiental básica, en términos académicos también se tiene la poca oferta de capacitación en la región en temas técnicos que permitan a la población enfocarse en aspectos específicos del desarrollo, además de tener mejores prácticas que permitan reducir incidentes y tener mejores resultados. Otro problema, también denunciado en el PDRT, es el poco sentido de pertenencia de la población y especialmente de la gente joven, la cual muestra desinterés por las actividades de la comunidad y no se involucran en procesos de desarrollo o de toma de decisión. Además de esto, se tiene la falta de infraestructura básica producto de deficiente gestión o planificación de las autoridades correspondientes, o la falta de presupuesto para la ejecución de las obras. De lo cual se puede concluir que existe una importante relación entre el bienestar social y del medio ambiente, incluidos los cuerpos de agua superficial.

Lo cual hace evidente lo multidimensional que son los problemas que eventualmente se relacionan con la contaminación de los cuerpos de agua, de manera que las causas de los problemas ambientales pueden estar en la dimensión social, económica o ambiental, o bien una combinación de las anteriores, por lo que los problemas a tratar se deben de abordar de la misma manera. Lo que demuestra la importancia de ampliar estudios relacionado a causas en específico que permitan definir soluciones integrales que puedan ser implementadas, considerando el tejido social, y no apresurarse en la toma de decisiones a menos de que sea necesario, lo que indirectamente muestra la importancia de la implementación de la metodología de evaluación de riesgos.

Por otro lado, en lo que corresponde a las consecuencias de los riesgos identificados, uno de los aspectos más relevantes es el efecto perjudicial agregado para la zona que implica la contaminación de los cuerpos de agua superficial, pues se afectan las actividades de pesca artesanal y principalmente de turismo, se perturba el componente estético y la presentación de la comunidad como un centro poblacional comprometido con el desarrollo sostenible, lo cual

es sumamente negativo dado la belleza escénica y la intensidad biológica de la Península de Osa y el cantón de Bahía Drake.

En esa misma línea, se debe mencionar la importancia que implica para la zona en muchos aspectos la Reserva Forestal Golfo Dulce, pues la cobertura vegetal densa que provee a la parte media y alta de la cuenca del río Agujas es un amortiguador para muchos de los factores condicionantes evaluados según los escenarios de riesgo. Esto a pesar de los muchos problemas que se le relacionan a la zona, los cuales denuncia del SINAC en el plan de manejo, además de manifestar diversas causas relacionadas a estos como la debilidad institucional para poder invertir de manera activa y contundente, o la baja participación y compromiso de los actores sociales de la zona.

Con respecto a la metodología de evaluación de riesgos propuesta, se hace la recomendación de aplicar la metodología en otros escenarios de exposición de manera que sea posible definir nuevas debilidades o vacíos que puedan existir, con el fin de fortalecerla y ampliar su rango de aplicación, aunque siempre vinculados con el factor de cuerpos de agua superficial. Además, es importante mencionar que la metodología como tal tiene limitantes, como lo que es que al evaluar las consecuencias relativas a los factores condicionantes específicos de cada suceso iniciador se hace de forma individual, aunque se sabe que la calidad del agua muestreada en los cuerpos de agua es producto de la suma de los efectos de todos los contaminantes y que estos no pueden ser evaluados de forma aislada.

Otra recomendación relativa a la aplicación de la metodología es el agregar algunos parámetros de calidad ambiental que permitan mejorar la caracterización de los cuerpos de agua y con ello su evaluación, para lo cual se sugiere la clorofila con el fin de emplear en conjunto con los valores de fósforo total los modelos de evaluación del establecimiento de condiciones de eutrofización en el agua. Asimismo, se hace la sugerencia de agregar el uso de bioindicadores a la investigación, los cuales son realmente útiles en la definición de las condiciones del medio, y si han sucedido cambios en la biota. Para lo cual se sugiere darles continuidad a los puntos de muestreo definidos, y al menos con dos muestreos anuales, en los que se incorpore la época seca y lluviosa, para lo que se sugiere febrero o marzo y setiembre u octubre, respectivamente.

Asimismo, se hace la recomendación de generar información base, además de la que ya esté disponible, por parte de los distintos actores sociales de la comunidad, como lo son los

miembros de la ASADA, del comité de desarrollo cantonal, miembros activos de los centros educativos, y miembros de los diferentes comercios existentes. De esa manera es posible incorporar información más fresca y veraz de las condiciones en las que se desarrolla la comunidad, tal como datos de consumo de agua mensual, el papel y accesibilidad que muestra la Municipalidad de Osa hacia los problemas de la comunidad, las deficiencias percibidas en los planes de estudio, la verdadera participación de los estudiantes en los centros educativos, y la afluencia de turistas en la zona, así como su estacionalidad.

Aunado a esto, se hace la recomendación de verificar la existencia de datos previos de calidad de agua en la zona que puedan ser extrapolados con los datos recopilados, de manera que se desarrolle un escenario más amplio. Pues es de suma importancia mencionar que el presente proyecto solo posee dos muestras de calidad de agua de los cuerpos de agua para la cuenca de playa Colorada y tres para algunos de los parámetros de la cuenca del río Agujas, lo que los hace poco representativos, dado que se trata de datos puntuales en un amplio campo de posibilidades, y es claro que es necesario más datos y de forma periódica para poder tener conclusiones definitivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, H., & Mora, R. &. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes. *Revista Geográfica de América Central N. 53*.

Angulo, J., & Román, M. (2013). *Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sotenible.* San José: Stanford University.

Berdugo, A. G. (2016). *Análisis multiespectral de imagenes satelitales para evaluar variaciones espacio-temporales en la calidad del agua del embalse el Guájaro .* Barranquilla: Universidad de la Costa.

Boyd, C. (2020). *Water Quality.* Auburn: Springer.

Canga, L., Cortés, A., & Martín, V. (2021). *Unidad docente de Edafología*. Obtenido de ANÁLISIS DE RIESGOS AMBIENTALES. NORMA UNE 150008: https://www.ucm.es/edafologia/modulo-9-analisis-de-riesgos-ambientales-norma-une-150008

Carretero, A. (2014). *Anavam.* Obtenido de http://anavam.com/docs/semana-sostenibilidad-II-ponencia-norma-UNE-150008-2008-analisis-y-evaluacion-del-riesgo-ambiental.pdf

Centro de Información Geográfica. (2004). *Teledetección.* Madrid: Gobierno de España.

Consejo Nacional de Áreas de Conservación. (2019). *Plan de Manejo de la Reserva Forestal de Golfo Dulce.* San José: Gobierno de Costa Rica.

Dirección General de Calidad Ambiental. (2010). *Guía de evaluación de riesgos ambientales.* Lima, Perú: Ministerio de Ambiente.

Enviromental Protection Agency . (2001). *PARAMETERS OF WATER QUALITY.* Johnstown Castle, Ireland: Enviromental Protection Agency .

Espín, P. (2016). *Estudio de los flujos de contaminación transportados por un sistema de saneamiento y drenaje unitario en tiempo de lluvia para la ciudad de Murcia.* Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

Ferre, E. S. (1999). Suelos y morfología en el Parque Natural de los Montes de Málaga. *Revista de xeología galega e do hercícino peninsular* .

Gaspari, F. (2012). *.Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires argentina.* La Plara: Septimo congreso del medio ambiente.

Geomatica. (2019). *Características de las misiones de los satélites Landsat.* Geomatica Ambiental.

GIS4DEV. (2019). Landsat 8 Pan-sharpening. *QGIS*.

Gobierno de Costa Rica . (2007). *Reglamento de evaluacion y clasificacion de cuerpos de agua superficiales.pdf.* San José: Poder Ejecutivo.

Gobierno Esapaña. (2008). *UNE 150008 Análisis y evaluación del riesgo ambiental.* Madrid, España: AENOR.

González, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos de imagenes satelitales Landsat ETM+.* Tlaquepaque: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente .

Gonzalez, P. (2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes.* Chile: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

IMN. (2021). *Instituto Meteorológico Nacional*. Obtenido de Atlas Climatológico: https://www.imn.ac.cr/web/imn/39

Instituto de Desarrollo Rural. (2017). *Plan de Desarrollo Rural Territorial del Territorio Península de Osa.* San José.

Instituto de Desarrollo Rural. (2017). *Plan Nacional de Desarrollo Rural Territorial 2017-2022.* San José: Instituto de desarrollo rural.

INTA-COSTA RICA. (2016). *Suelos de Costa Rica .* San José: Instituto nacional de innovación y trasferencia en tecnología agropecuria.

Jardí, M. (1984). Forma de la cuenca de drenaje. Análisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 41 - 68.

Livenais, J.-B. (2009). *Caracterización de las fuentes de contaminación de las agua litorales de la playa Colorada, Bahía Drake, Península de Osa, Costa Rica.* San Pedro, San José: Universidad de Costa Rica.

Lux, B. (2012). Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. *Universidad de San Carlos*, 2-5.

MIDEPLAN. (2013). *Áreas de análisis del desarrollo .* Área de Planificación Regional MIDEPLAN.

MIDEPLAN. (2021). *Índice de desarrollo social* . Obtenido de Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica: https://www.mideplan.go.cr/indice-desarrollo-social

Ministerio de Ambiente de Perú. (2010). *Guía de evaluación de riesgos ambientales.* Lima: Dirección General de Calidad AMbiental.

Mora, D. A. (2007). Aproximación al estudio de la historia del cantón de Osa (1914 - 1990. *REVISTA ELECTRÓNICA DE HISTORIA*, pp118, 119.

Mora, D., & Portuguez, C. (2017). *Agua para consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2016. Metas al 2022 y al 2030.* San José: Tecnología en marcha.

Municipalidad de Osa. (2016). *Plan municipal para la gestión integral de los residuos sólidos en el cantón de Osa.* PRODELO- GT.

Municipalidad de Osa. (2021). *Reglamento de zonificación de uso del suelo de Osa.* Osa, Puntarenas.

Oficina Regional de Osa. (2016). *Caracterización del Territorio Península de Osa.* San José: Instituto de Desarrollo Rural.

Oficina Subregional de Osa; Amador, S. (2016). *Caracterización del Territorio Península de Osa.* Instituto de Desarrollo Rural.

Oficina Subregional Osa. (2016). *Caracterización del Territorio Península de Osa.* San José: INDER.

Quesada, R. (2007). *Los Bosque de Costa Rica.* Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Rojas, E. (2005). *Análisis de riesgos ambientales y sociales en los proyectos de préstamos e inversión: Metodología.* CLACDS.

Román, M., & Ángulo, J. (2013). *Panorama socioeconómico de los cantones de Osa y Golfito: tendencias y desafíos para el desarrollo sostenible.* San Jose: INOGO, Stanford Woods Institute for the Environment.

Rosero-Bixby, L. e. (2002). Bosque y población en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista de biología tropical* , 586 - 587.

R-SINAC-CONAC-033-2019. (2019). *Plan General de Manejo de la Reserva Forestal Golfo Dulce.* San Jose: Consejo Nacional de Áreas de Conservación.

Sancho, J. (2021). *biocorredores.org*. Obtenido de Proyecto Corredores biológicos: http://biocorredores.org/corredoresbiologicos/

Serrano, A. (2017). *Notas de clases del curso de hidrología.*

SNIT. (2020). Obtenido de Sistema Nacional de Información Territorial: https://www.snitcr.go.cr/

Teledet. (2018). *Imagenes satélitales.* El Pinar, Uruguay.

Vidal, P. (2017). *Material del curso de Análisis Ambiental I.* San Pedro.

ANEXOS

Anexo A. Solubilidad del oxígeno en función de la temperatura y la salinidad

Table 7.6 The solubility of oxygen (mg/L) as a function of temperature and salinity (moist air, barometric pressure = 760 mm Hg) (Benson and Krause 1984)

Temp.	Salinity (g/L)								
(°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	14.602	14.112	13.638	13.180	12.737	12.309	11.896	11.497	11.111
1	14.198	13.725	13.268	12.825	12.398	11.984	11.585	11.198	10.825
2	13.813	13.356	12.914	12.487	12.073	11.674	11.287	10.913	10.552
3	13.445	13.004	12.576	12.163	11.763	11.376	11.003	10.641	10.291
4	13.094	12.667	12.253	11.853	11.467	11.092	10.730	10.380	10.042
5	12.757	12.344	11.944	11.557	11.183	10.820	10.470	10.131	9.802
6	12.436	12.036	11.648	11.274	10.911	10.560	10.220	9.892	9.573
7	12.127	11.740	11.365	11.002	10.651	10.311	9.981	9.662	9.354
8	11.832	11.457	11.093	10.742	10.401	10.071	9.752	9.443	9.143
9	11.549	11.185	10.833	10.492	10.162	9.842	9.532	9.232	8.941
10	11.277	10.925	10.583	10.252	9.932	9.621	9.321	9.029	8.747
11	11.016	10.674	10.343	10.022	9.711	9.410	9.118	8.835	8.561
12	10.766	10.434	10.113	9.801	9.499	9.207	8.923	8.648	8.381
13	10.525	10.203	9.891	9.589	9.295	9.011	8.735	8.468	8.209
14	10.294	9.981	9.678	9.384	9.099	8.823	8.555	8.295	8.043
15	10.072	9.768	9.473	9.188	8.911	8.642	8.381	8.129	7.883
16	9.858	9.562	9.276	8.998	8.729	8.468	8.214	7.968	7.730
17	9.651	9.364	9.086	8.816	8.554	8.300	8.053	7.814	7.581
18	9.453	9.174	8.903	8.640	8.385	8.138	7.898	7.664	7.438
19	9.261	8.990	8.726	8.471	8.222	7.982	7.748	7.521	7.300
20	9.077	8.812	8.556	8.307	8.065	7.831	7.603	7.382	7.167
21	8.898	8.641	8.392	8.149	7.914	7.685	7.463	7.248	7.038
22	8.726	8.476	8.233	7.997	7.767	7.545	7.328	7.118	6.914
23	8.560	8.316	8.080	7.849	7.626	7.409	7.198	6.993	6.794
24	8.400	8.162	7.931	7.707	7.489	7.277	7.072	6.872	6.677
25	8.244	8.013	7.788	7.569	7.357	7.150	6.950	6.754	6.565
26	8.094	7.868	7.649	7.436	7.229	7.027	6.831	6.641	6.456
27	7.949	7.729	7.515	7.307	7.105	6.908	6.717	6.531	6.350
28	7.808	7.593	7.385	7.182	6.984	6.792	6.606	6.424	6.248
29	7.671	7.462	7.259	7.060	6.868	6.680	6.498	6.321	6.148
30	7.539	7.335	7.136	6.943	6.755	6.572	6.394	6.221	6.052
31	7.411	7.212	7.018	6.829	6.645	6.466	6.293	6.123	5.959
32	7.287	7.092	6.903	6.718	6.539	6.364	6.194	6.029	5.868
33	7.166	6.976	6.791	6.611	6.435	6.265	6.099	5.937	5.779
34	7.049	6.863	6.682	6.506	6.335	6.168	6.006	5.848	5.694
35	6.935	6.753	6.577	6.405	6.237	6.074	5.915	5.761	5.610
36	6.824	6.647	6.474	6.306	6.142	5.983	5.828	5.676	5.529
37	6.716	6.543	6.374	6.210	6.050	5.894	5.742	5.594	5.450
38	6.612	6.442	6.277	6.117	5.960	5.807	5.659	5.514	5.373
39	6.509	6.344	6.183	6.025	5.872	5.723	5.577	5.436	5.297
40	6.410	6.248	6.091	5.937	5.787	5.641	5.498	5.360	5.224

Anexo B. Efectos biológicos del bajo nivel de OD en peces

Efectos biológicos del bajo nivel de oxígeno disuelto (OD) en peces salmónidos y no salmónidoss e invertebrados acuáticos		
	oxígeno disuelto ($mg\ L^{-1}$)	
	En corriente	En grava
I. Aguas con salmón		
A. Embriónes en estado de larva		
Producción no deteriorada	11	8
Producción levemente deteriorada	9	6
Producción moderadamente deteriorada	8	5
Producción severamente deteriorada	7	4
Límite para evitar la mortalidad aguda	6	3
B. Otros estados de vida.		
Producción no deteriorada	8	
Producción levemente deteriorada	6	
producción moderadamente deteriorada.	5	
Producción en severo deterioro	4	
Limite para evitar la mortalidad aguda	3	
II. Aguas sin salmón		
A. Etapas tempranas de la vida		
Producción no deteriorada	6.5	
Producción ligeramente deteriorada.	5.5	
Producción moderadamente deteriorada	5	
Producción severamente deteriorada.	4.5	
Límite para evitar la mortalidad aguda	4	
B. Etapas de vida temprana prepara		
Producción no deteriorada	6	
Producción ligeramente deteriorada	5	
Producción Moderadamente deteriorada	4	
Producción severamente deteriorada	3.5	
Límite sever para evitar la mortalidad	3	

Anexo C. Resultados de pruebas de plaguicidas realizado en febrero 2020 por el CICA

La muestra representativa para el proyecto es la #6.

RESULTADOS								
MAR-27**								
Análisis	Familia	Unidad	Muestra #5	Muestra #6	Muestra #7	Muestra #8	Límite de Detección	Límite de Cuantificación
Aldicarb	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,13	0,26
Ametrina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,075	0,15
Atrazina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,13	0,26
Azinfós-metil	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,90	1,7
Azoxistrobin	Estrobilurina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,19	0,37
Bentazon	Benzotiadiazoles	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,22	0,42
Bitertanol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,40	0,77
Bromacil	Uracilo	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,085	0,17
Cadusafos	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,18	0,35
Carbaril	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,069	0,14
Carbendazín	Bencimidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,17	0,33
Carbofurán	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,062	0,12
Cianazina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,13	0,26
Diclorvós	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,28	0,54
Difenoconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,34	0,65
Dimetoato	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,86	1,6
Diurón	Urea sustituida	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,22	0,43
Epoxiconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,23	0,58

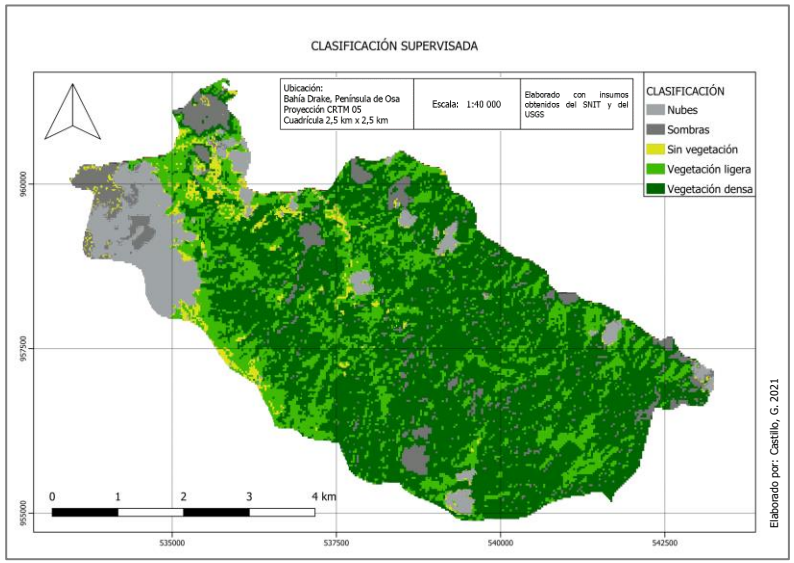
RESULTADOS								
MAR-27**								
Análisis	Familia	Unidad	Muestra #5	Muestra #6	Muestra #7	Muestra #8	Límite de Detección	Límite de Cuantificación
Etoprofos	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,57	1,0
Fenamifós	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,21	0,41
Fenbuconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,33	0,65
Fluazifop-p-butil	Derivado ácido carboxílico	µg/L	ND	ND	ND	ND	1,5	2,7
Foxim	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,90	1,7
Hexaconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,35	0,67
Imazalil	Imidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,18	0,36
Imazapic	Imidazolinona	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,10	0,17
Imazapir	Imidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,14	0,28
Imidacloprid	Neoicotinoide	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,12	0,25
Isazofos	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,16	0,32
Isoprutoturón	Urea	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,18	0,32
Kresoxin-metil	Estrobilurina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,30	0,59
Linurón	Urea	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,21	0,50
MCPA	Fenoxi ácido	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,14	0,28
Metalaxil	Acilalanina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,57	1,0
Metamidofós	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,21	0,41
Metiocarb	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,21	0,41
Metomil	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,29	0,57
Miclobutanilo	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,10	0,18
Monocrotofós	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,11	0,21
Oxamil	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,13	0,25
Piraclostrobina	Estrobilurina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,35	0,67
Pirimetanil	Pirimidina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,094	0,18
Pirimicarb	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,21	0,41
Pirimifos-metil	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,18	0,35
Procloraz	Imidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,46	0,88
Prometón	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,16	0,31
Propanil	Anilida	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,80	1,5
Propiconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,17	0,34
Simazina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,23	0,34

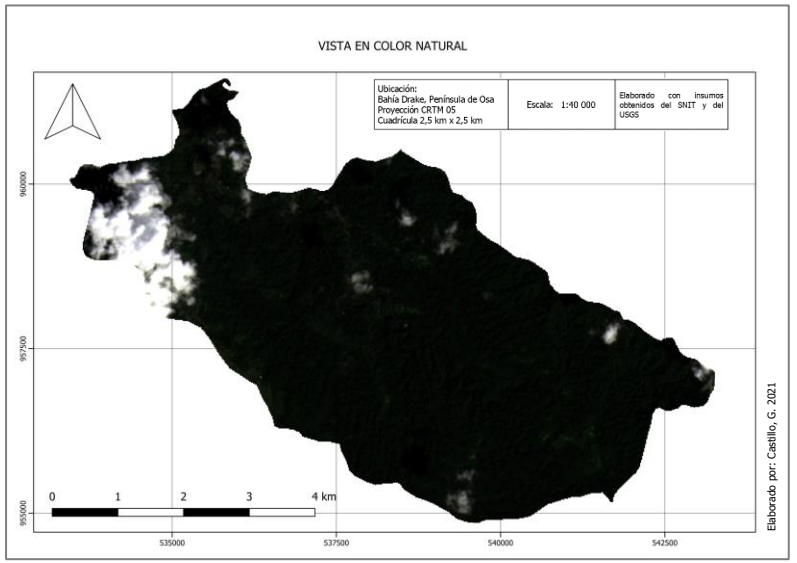
MAR-27**								
Análisis	Familia	Unidad	Muestra #5	Muestra #6	Muestra #7	Muestra #8	Límite de Detección	Límite de Cuantificación
Simetrina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,22	0,43
Tebuconazol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,25	0,48
Terbutrina	Triazina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,043	0,083
Tiabendazol	Bencimidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,14	0,28
Tiametoxam	Neonicotinoide	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,96	1,7
Tiofanato	Bencimidazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,72	1,4
Triadimefón	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,16	0,31
Triadimenol	Triazol	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,69	1,3
Triazofos	Organofosforado	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,16	0,32
Tridemorf	Morfolina	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,11	0,22
2,4-D	Fenoxi ácido	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,16	0,32
3-cetocarbofurán	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,15	0,30
3-hidroxicarbofurán	Carbamato	µg/L	ND	ND	ND	ND	0,26	0,51

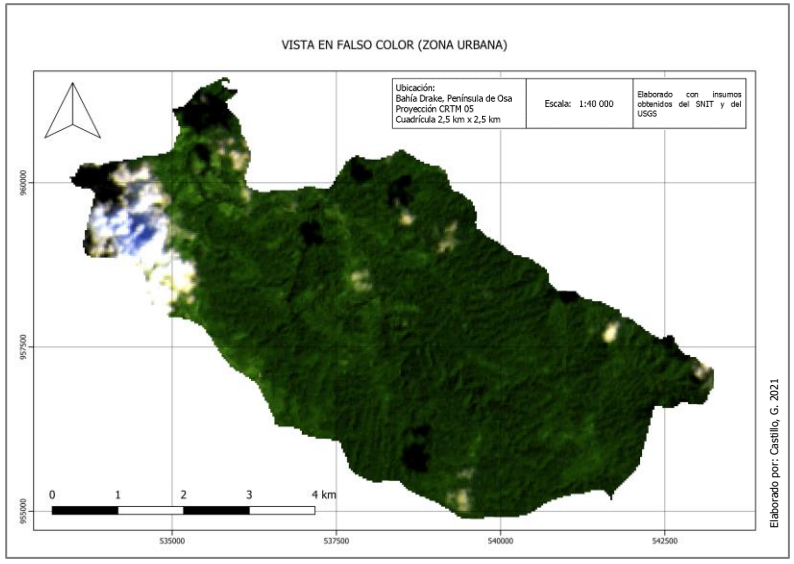
APÉNDICE

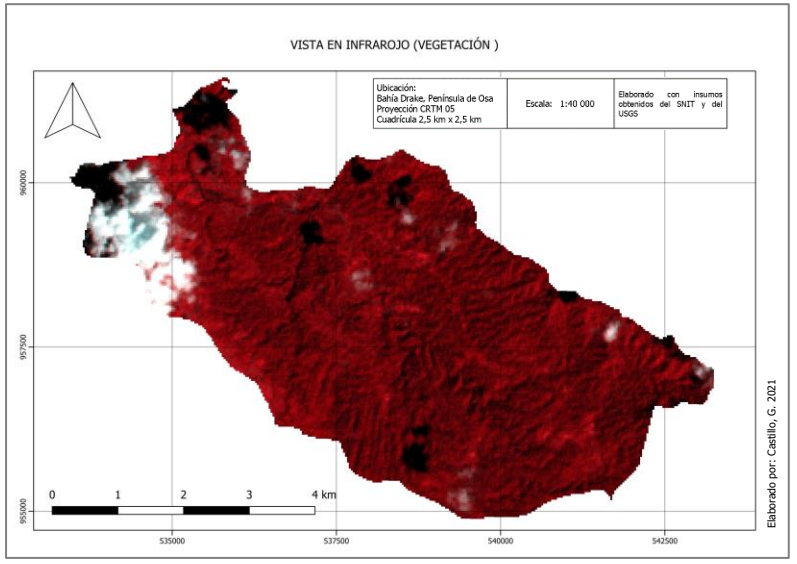
Apéndice A. Imágenes de satelitales procesadas, resultados de clasificación supervisada, imágenes en falso color e infrarrojo

RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL CUENCA RÍO AGUJITAS 2014

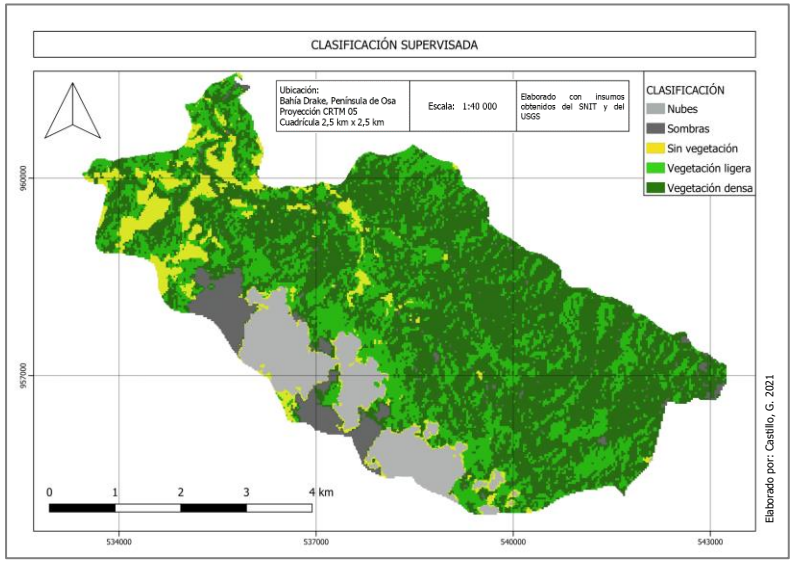


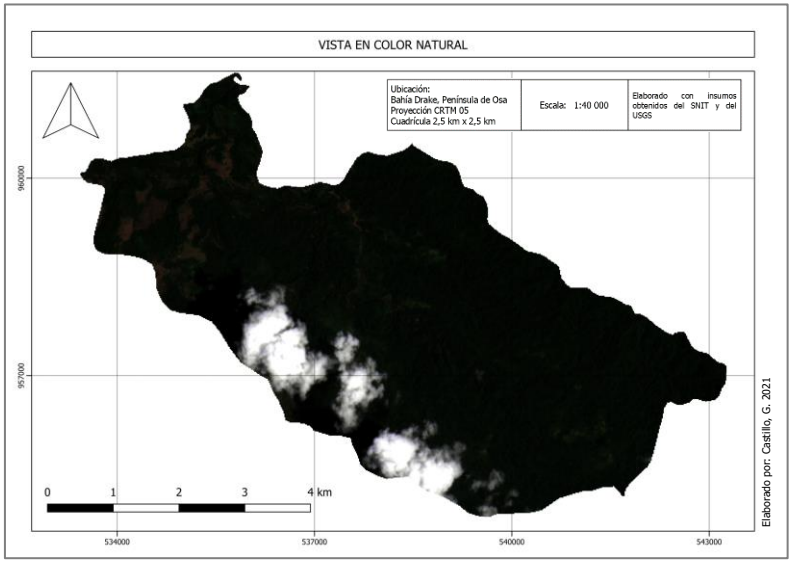


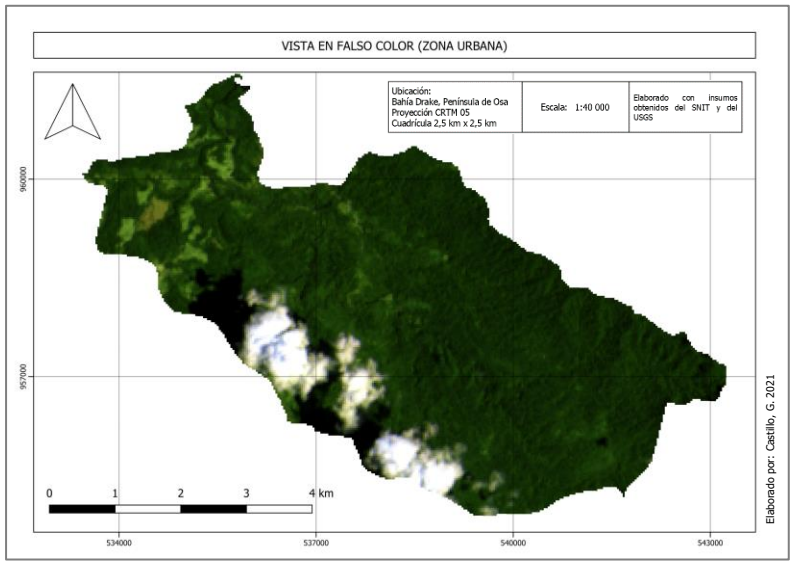


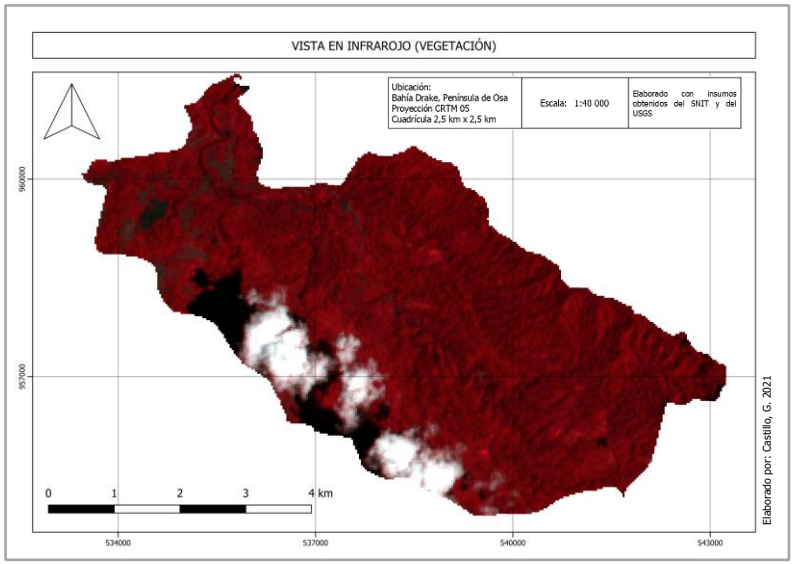


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL CUENCA RÍO AGUJITAS 2016

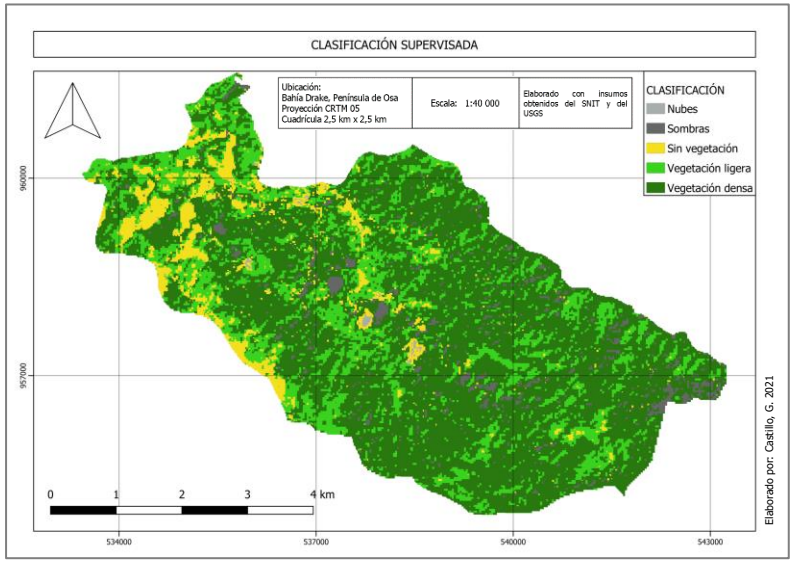


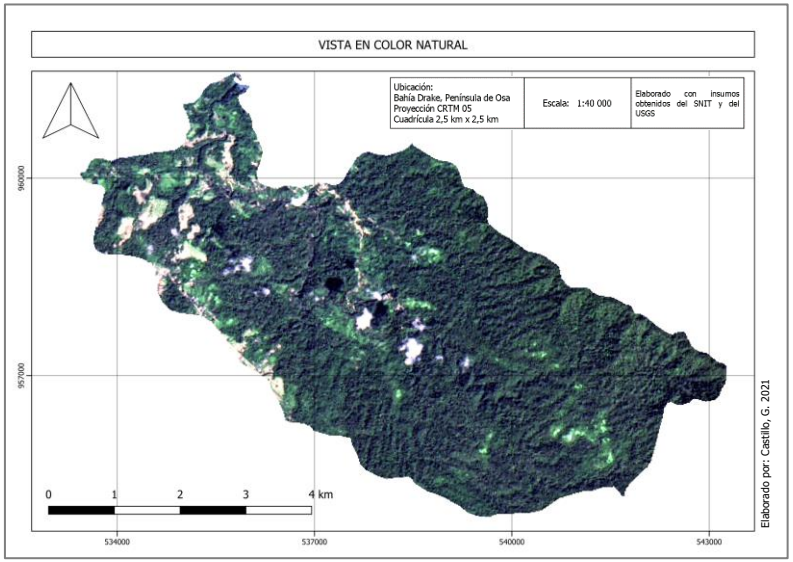


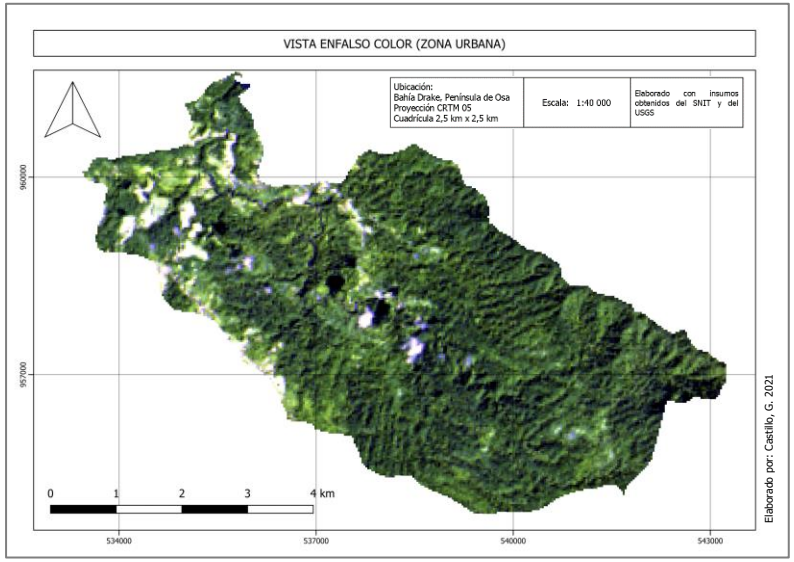


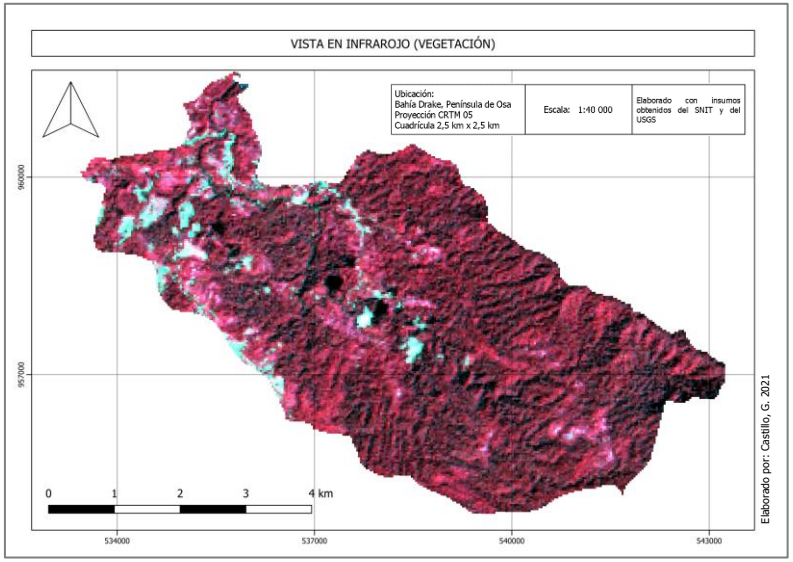


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL CUENCA RÍO AGUJITAS 2018

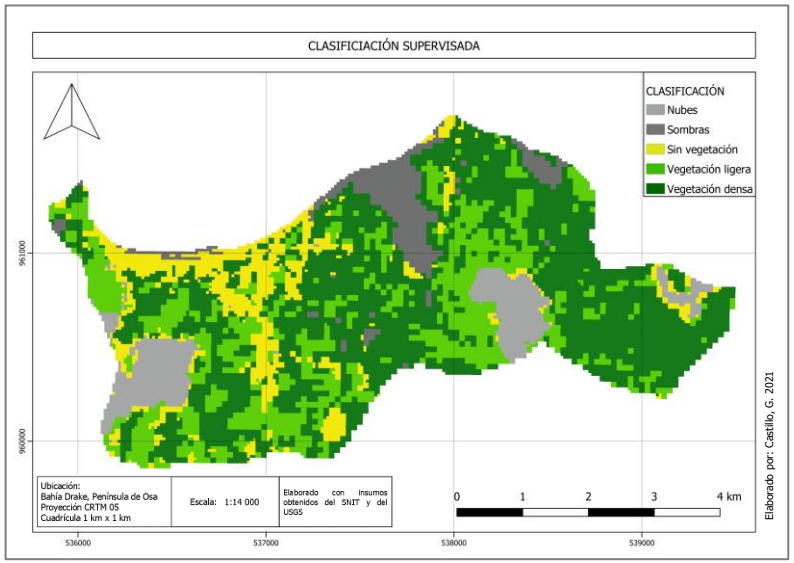


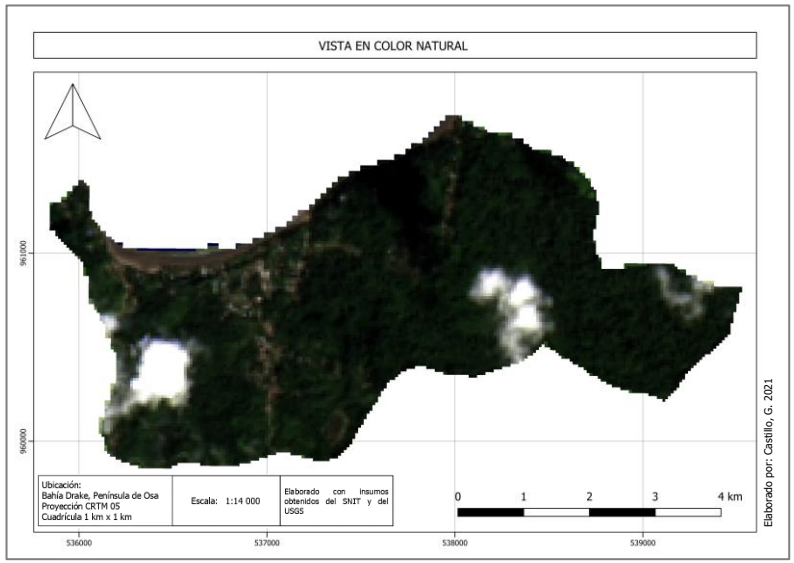


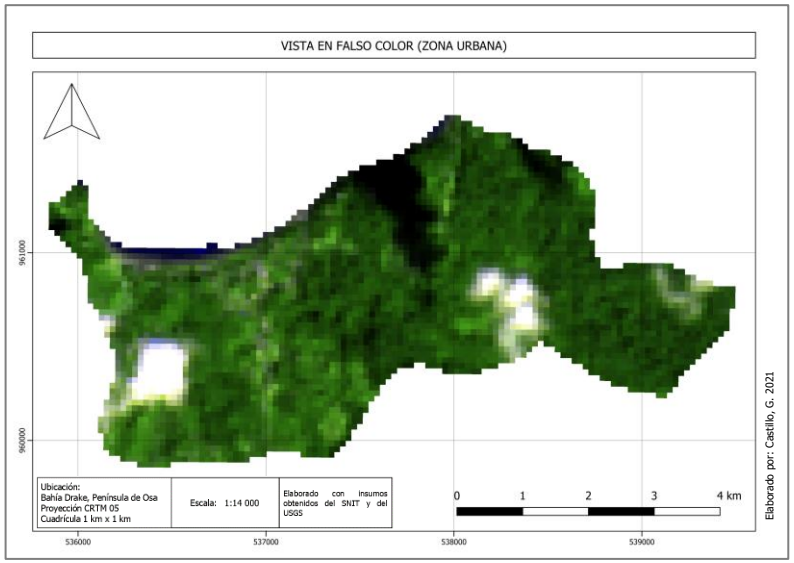


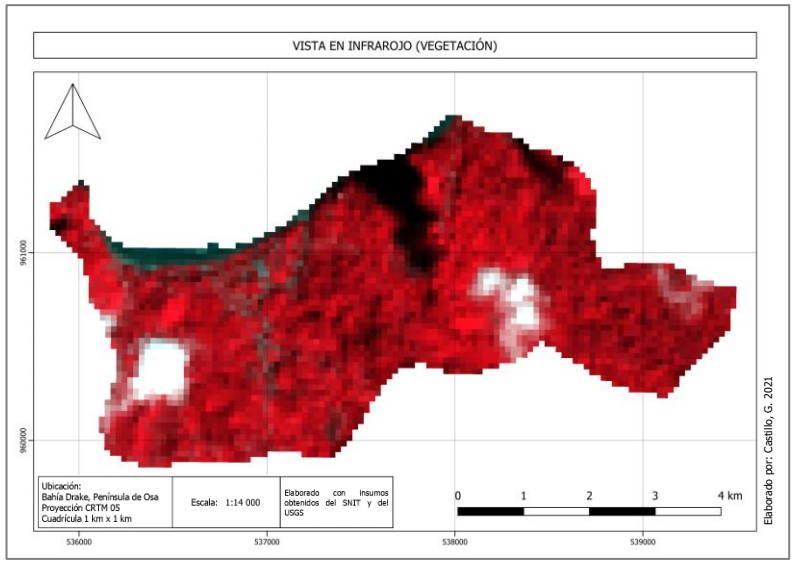


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL QUEB. PLAYA COLORADA 2014

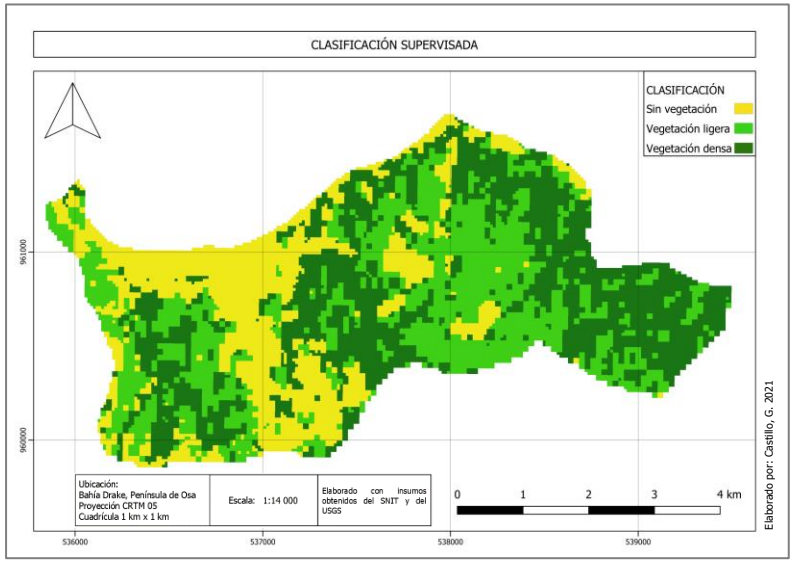


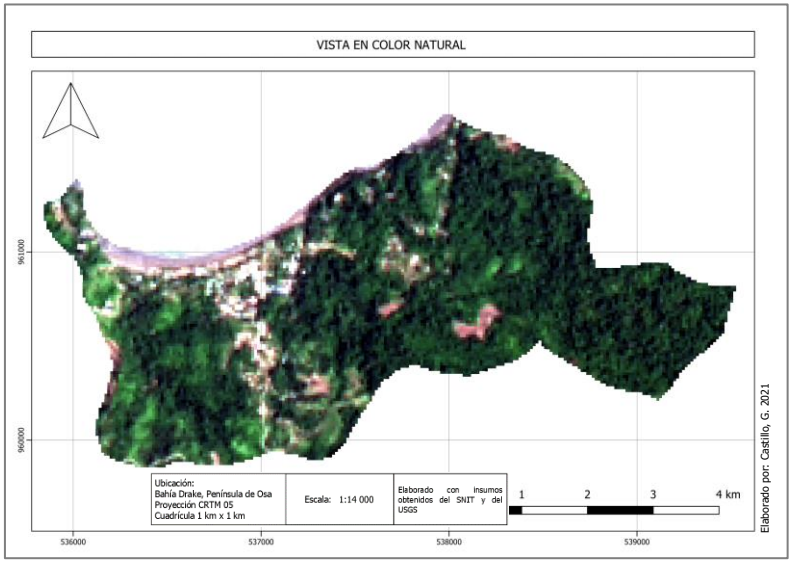


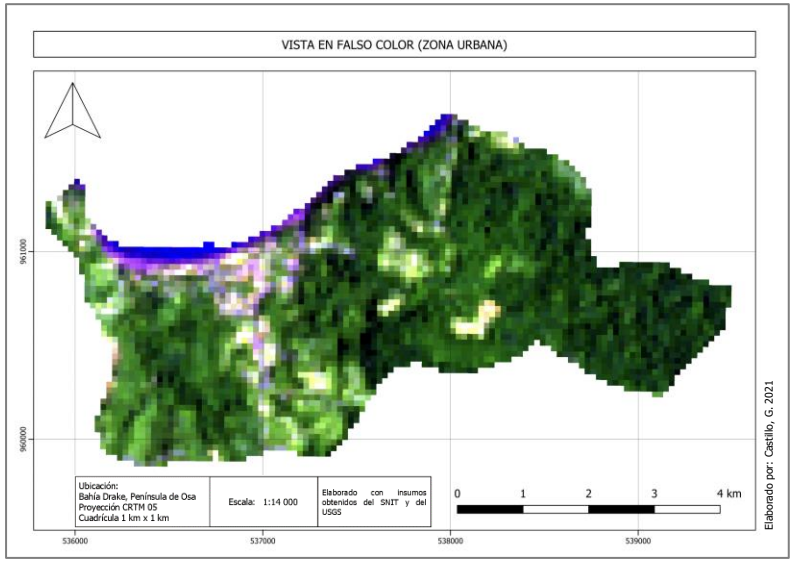


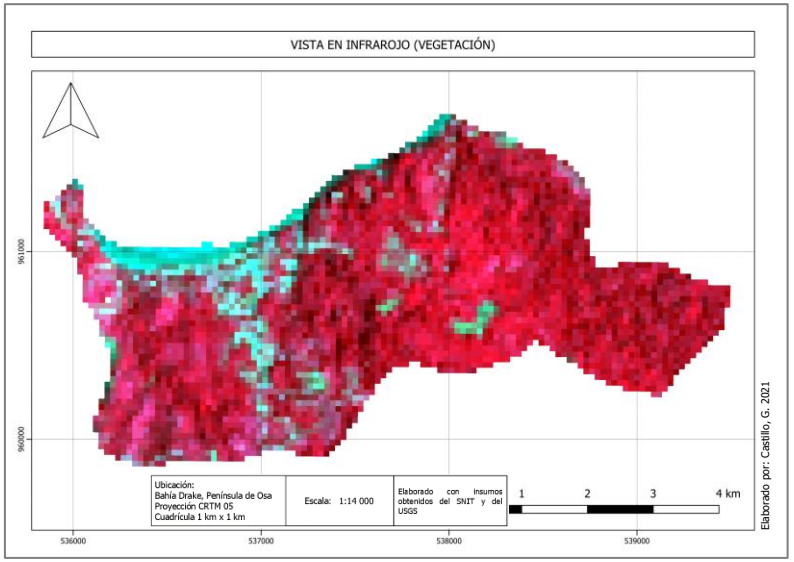


RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL QUEB. PLAYA COLORADA 2016









RESULTADOS ANÁLSIS MULTIESPECTRAL QUEB. PLAYA COLORADA 2018